



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de São José do Rio Preto

Marcos Roberto Moreira da Silva Junior

**RADIOATIVIDADE NATURAL EM REGIÕES DO BRASIL E PORTUGAL:
UMA CORRELAÇÃO ENTRE EXALAÇÃO DE RADÔNIO E
CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO.**

São José do Rio Preto
2019

Marcos Roberto Moreira da Silva Junior

**RADIOATIVIDADE NATURAL EM REGIÕES DO BRASIL E PORTUGAL:
UMA CORRELAÇÃO ENTRE EXALAÇÃO DE RADÔNIO E
CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO.**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Química, junto ao Programa de Pós-Graduação em Química, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto

Orientador: Prof. Dr. Marcos Fernando de Souza Teixeira.

Coorientador: Prof. Dr. João Osvaldo Rodrigues Nunes

Financiadora: CAPES

São José do Rio Preto
2019

M838r

Moreira-Silva, Marcos Roberto Junior

Radioatividade natural em regiões do Brasil e Portugal: uma correlação entre exalação de radônio e concentração de chumbo / Marcos Roberto Junior Moreira-Silva.

-- São José do Rio Preto, 2019

101 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: Marcos Fernando de Souza Teixeira

Coorientador: João Osvaldo Rodrigues Nunes

1. Especiação Química. 2. Geoquímica analítica. 3. Avaliação Ambiental. 4. Química Analítica. 5. Radioatividade. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Marcos Roberto Moreira da Silva Junior

**RADIOATIVIDADE NATURAL EM REGIÕES DO BRASIL E
PORTUGAL: UMA CORRELAÇÃO ENTRE EXALAÇÃO DE
RADÔNIO E CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO.**

Tese apresentada como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Química, junto
ao Programa de Pós-Graduação em Química, do
Instituto de Biociências, Letras e Ciências
Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio
de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio
Preto.

Financiadora: CAPES

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcos Fernando de Souza Teixeira
UNESP – Presidente Prudente
Orientador

Prof. Dr. Carlos Alberto Tello Sáenz
UNESP – Presidente Prudente

Profa. Dra. Rosane Freire Boina
UNESP – Presidente Prudente

Prof. Dr. Luiz Humberto Marcolino Junior
UFPR – Curitiba

Prof. Dr. Caio Augusto Marques dos Santos
UFMT – Rondonópolis

Presidente Prudente

28 de fevereiro de 2019

Dedico esse trabalho a todos que me ensinaram: aos meus queridos através do amor, e aos meus desafetos através da dor. Lembrando que aquilo que o amor ensina, nada nem ninguém pode apagar.

Agradecimentos

À **Deus** pela dádiva da vida, que me ajudou, sustentou e fortaleceu em todos os momentos;

Ao meu pai, **Marcos**, que sempre me apoiou e incentivou, acreditando inabalavelmente nas minhas escolhas;

A minha **mãe** (in memorian), pela educação e amor dedicados, que me fizeram aquilo que realmente sou, fica a vontade e a saudade de um forte abraço de agradecimento;

A minha avó **Conceição**, àquela que é meu suporte de vida, que me ensinou os valores mais importantes e que mesmo em momentos complicados soube me impressionar com seu amor incondicional;

A minha avó **Alda**, que traz a sabedoria já carimbada no nome, que sempre trouxe palavras de acalento ao meu coração;

A toda a minha família, em especial aos meu **tios** que me incentivaram com amor, carinho e paciência durante esse período. Aos meus primos (**Diego, Cacá, Giovanni, Mirella, Murillo, Zézinho, Jeronymo, Bruno, Estella e Thiago**) por serem tão amáveis e tornarem nossos momentos juntos, os mais memoráveis;

Ao Prof. Dr. **Marcos Teixeira**, responsável como orientador, pelo seu amor à ciência e por acreditar em mim, mesmo com todas as minhas limitações, por ter me acolhido como irmão e amigo, pela oportunidade de tê-lo como família em todo esses anos juntos. Agradeço a **Pati Seraphim**, que tenho infinito carinho, pela amizade, pelas viagens divertidas e pelo alto astral contagiante;

Ao Prof. Dr. **João Osvaldo**, pelo aceite da co-orientação, pelas instruções e discussões desta pesquisa, pela enorme paciência e esforço nos trabalhos de campo, meu respeito pela sua competência como pesquisador e professor, e sua humildade como ser humano;

Ao Prof. Dr. **Carlos Tello**, que desde o início foi presente de forma direta para a realização desse trabalho, disponibilizando do seu tempo e experiência na área da geociência;

Ao Prof. Dr. **Alcides Pereira**, que me acolheu em seu laboratório na Universidade de Coimbra, onde nunca mediu esforços para transmitir seus conhecimentos e me proporcionou uma das maiores experiências da minha vida, a vivência junto ao Laboratório de Radioatividade Natural ;

Aos colegas de grupo do LRN, que me proporcionaram grande aprendizagem, sempre com muita paciência, sou grato pela acolhida pois sem isso seria impossível aproveitar o tempo em Portugal. Sou muito grato a vocês: Jéssica, Filipa, Sérgio, Nelson e Vasco.

Aos meus amigos que foram do GPES: **Camila Rizzardi, Denilson, Natíza, Laís e Fernanda** que participaram do meu processo evolutivo, pelas agradáveis companhias e pelos momentos inesquecíveis de descontração e muitas risadas;

Meus amigos do grupo de pesquisa, **André, Diego Parra, Yuri, Dani, Camila Fernanda, Jéssica, Marianna, Douglas, Kaio e Heitor**, vocês fizeram total diferença na minha caminhada de pós graduando, são sinônimo de boa companhia e muito mais que isso, são parte da família que pude escolher e viver todos esses anos;

Ao **Diego Parra**, pela amizade incondicional, pelos papéis fantásticos, pela oportunidade em dividir a mesma casa e formar uma república sensacional, pelas caronas e acima de tudo, pelo carinho e por ser um cara admirável;

A **Dani Chagas**, sou grato pela sua amizade, por você ser um exemplo de ser humano maravilhoso, pelos copos de cerveja bem aproveitados e por tantos anos me aturando;

Ao casal que demonstrou uma amizade incondicional, **Prof. Dr. Deuber Lincon e Jéssyka**, vocês foram fundamentais nesses quatro anos, sou grato pelos momentos fenomenais que me proporcionaram, amo vocês;

Ao prof. **Dr. Sérgio Lima**, pela amizade fiel e companheirismo, você me ensinou muito e sempre será uma referência de ser humano e profissional;

Aos amigos, àqueles que nomeio de irmãos, desde a graduação ao meu lado, **Larissa, Mamute, Thaísa, Camila Proença, Glauciana**, com certeza vocês revolucionaram o sentido da palavra amizade, foram essenciais na minha vida, sem vocês não teria graça nem sentido tudo aquilo que vivi em Presidente Prudente, vocês são os personagens principais da minha história;

As eternas e mais queridas vizinhas de todos os tempos, por todo carinho e dedicação em nossa amizade, por estarem comigo e me mostrarem valores que carregarei para vida inteira: **Edilene, Carol e Talita**;

A todos os professores da graduação do curso de Licenciatura em Química da FCT - UNESP, em especial àqueles que foram muito mais que simples professores, como o Prof. Dr. **Homero** pelos ricos ensinamentos, pelas melhores histórias, narradas sempre com muito afinho e por sua genialidade e simplicidade;

Aos docentes e funcionários do Departamento de Física, Química e Biologia da FCT - UNESP, particularmente, a **Juvanir, Fernanda e Angélica**, pelo carinho e ótima convivência durante esses anos;

Aos técnicos de laboratório, **Sidney, Marcelo, Gabriel e Murillo**, que sempre estiveram dispostos para colaborar, com o sorriso no rosto;

Ao técnico **Vítor**, pelo auxílio nas medidas granulométricas, bem como a todos os integrantes do Laboratório de Sedimentologia e Análise de Solos, na FCT - UNESP;

Por fim, mas não menos importante, aos meus amigos de longa data: **Elvio, Bia, Coala, Gabi, Didi, Bell, Carol Pelizzon, Marianna Manfio, Honey, Daniel, Junior, Augusto, Magno, Laura, Leandra, Malu**, que são primordiais em minha vida;

A todos que de alguma maneira cederam uma parcela de carinho, esforço, incentivo para a realização desse trabalho;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, à qual agradeço.

*"Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada.
Apenas dê o primeiro passo".*

Martin Luther King

Resumo

Os principais objetivos desse trabalho, que envolve importantes áreas da ciência como química, física nuclear e geologia, são quantificar as atividades de gás radônio e concentração de chumbo total em regiões específicas do Brasil e Portugal, além de elaborar mapas indicativos do teor geogênico desses elementos em regiões de falhas geológicas. As zonas de falha geológica são regiões onde ocorreram fraturamentos e esmagamentos intensos de rocha e possuem a característica intrínseca de liberarem maior quantidade de gás Rn. As regiões de falhas também podem ser alvo de estudos voltados à quantificação de metais, principalmente de chumbo (Pb) por estar inserido na série natural de decaimento radioativo do urânio. As amostras de solo e rocha foram coletadas de acordo com estudos prévios em dois cenários, o primeiro abrange regiões específicas de Portugal (Sangemil e Oliveira do Hospital) e o segundo cenário refere-se ao município de Presidente Prudente, estado de São Paulo, Brasil. As amostras foram analisadas utilizando-se de algumas técnicas como: espectrometria com detector de germânio de alta resolução, onde quantificou-se as atividades de ^{235}U , ^{228}Ac , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{212}Bi , ^{214}Bi , ^{234}Pa , ^{208}Tl e ^{40}K ; medidor Alpha Guard instalado em contentores metálicos onde determinou-se o coeficiente de emanção por meio das concentrações de Rn e Ra; medidor Alpha Guard e câmara de ionização que possibilitou quantificar Rn e U *in situ*, análise eletroquímica via técnica de voltametria de redissolução anódica, onde aferiu-se o teor de Pb total das amostras e análise granulométrica. As atividades dos radionuclídeos nas amostras apresentaram-se heterogêneas principalmente ao se tratar dos valores atrelados à atividade de U^{235} comparado às atividades de U^{238} e Th^{232} . Em Oliveira do Hospital, valores elevados de U^{238} indicaram o enriquecimento de urânio, provavelmente pelo fato de serem rochas do tipo granítica. As razões das atividades entre ^{238}U e ^{230}Th indicaram valores característicos de rochas ígneas recentes. Para as áreas com maior exalação de Rn associou-se também maior atividade de urânio. De acordo com os dados obtidos de concentrações de Rn no leito das rochas para a região de Sangemil e para a área específica em Presidente Prudente, desenvolveram-se croquis da região indicando a exalação de radônio geogênico. Para o valor mais alto, de $1.609.273 \text{ Bq m}^{-3}$ de gás radônio, propôs-se como concentração anômalas ligada fortemente às falhas geológicas enriquecidas de urânio. As amostras do cenário 1, mesmo apresentando valores

radiométricos mais elevados, característicos de regiões de falhas geológicas e até mesmo de áreas enriquecidas de urânio, indicaram concentrações de Pb total relativamente baixas, sendo consideradas dentro na média natural de granitos. Para o cenário 2, observou-se uma relação direta entre o aumento da concentração de Pb, atividade de Rn e fração de argila que compõem as amostras de solo.

Palavras-chave: Radônio, Chumbo, Falhas Geológicas.

Abstract

The main objectives of this work, that involve important areas of science such as chemistry, nuclear physics and geology, are to quantify uranium, radon gas and total lead concentration in specific areas from Brazil and Portugal, and to prepare geogenic maps indicating the content of these elements in geological faults regions. The geologic fault zones are regions where fractures and intense crushing of the rock occurred, with varying thickness in centimeters until kilometers. Due to the intrinsic characteristic of releasing a larger amount of Rn gas, geological fault regions can also be the target of studies aimed at the quantification of metals, mainly lead (Pb), as it is included in the natural decay series of uranium. Soil and rock samples were collected according to previous studies in two scenarios, the first covering specific regions of Portugal (Sangemil and Oliveira do Hospital) and the second scenario refers to Presidente Prudente municipality, state of São Paulo, Brazil. The samples were analyzed using some techniques such as HPGe detector, where the activities of ^{235}U , ^{228}Ac , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{212}Bi , ^{214}Bi , ^{234}Pa , ^{208}Tl and ^{40}K were quantified; Alpha Guard installed in metal containers where the emanation coefficient was determined by the Rn and Ra concentrations ; Alpha Guard and ionization chamber that possibilited to quantify Rn and U in situ and Anodic Stripping Voltammetry that the total Pb content of the samples was measured. The radionuclides activities of the the samples were heterogeneous mainly when dealing with the values linked to ^{235}U activity compared to ^{238}U and ^{232}Th activities. In Oliveira do Hospital, high values of ^{238}U indicated uranium enrichment, probably because they are granitic rocks. The activity ratios measure between ^{238}U and ^{230}Th indicated characteristic of recent igneous rocks. According to ^{222}Rn concentrations in the bed of rocks in Sangemil region, a geogenic radon map was developed indicating the radon exhalation values. For the highest value, of $1,609,273 \text{ Bq m}^{-3}$ of radon gas, it was proposed as anomalous concentration linked to geological uranium enrichment. The samples from the first scenario, even with higher radiometric values, characteristic of geological faults regions and even enriched areas of uranium, indicated relatively low total lead concentrations, being considered within the natural mean of granites. For the second scenario , a direct relationship between the increase of Pb concentration, Rn activity and clay fraction that compose the soil samples was observed.

Keywords: Radon, Lead, Geological Fault

Lista de Figuras

Figura 1 - Séries naturais de decaimento radioativo do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th	18
Figura 2 - Formação do Rn a partir do decaimento do núcleo do elemento Ra.	24
Figura 3- Representação dos grãos, poros, pontos iniciais e finais dos elementos formados por decaimento radioativo em rochas.....	25
Figura 4- Representação dos processos de emanação e exalação de gás Rn.....	25
Figura 5 - Componentes estruturais de uma falha geológica.....	28
Figura 6- Falhas normais e indicação de suas tensões principais.....	29
Figura 7- Falhas reversas e indicação de suas tensões principais.....	30
Figura 8 - Falhas transcorrentes e indicação de suas tensões principais.	30
Figura 9- Mapa dos principais lineamentos e falhas geológicas do território brasileiro.	31
Figura 10- Mapa dos principais lineamentos e falhas no território português.	32
Figura 11- Representação esquemática da rocha (R) e do regolito (tudo que esta acima da rocha). O regolito subdivide-se em saprólito (C) e solum, que, por sua vez, é composto de várias camadas (os horizontes O, A, E e B).	34
Figura 12 - Diagrama textural detalhado adotado pela EMBRAPA.	37
Figura 13 - Produtos finais estáveis oriundos dos decaimentos radioativos do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th	39
Figura 14 - Ilustração do mineral galena (PbS)......	40
Figura 15 - Identificação das áreas de coleta no cenário 1: Sangemil e Oliveira do Hospital.....	46
Figura 16 - Identificação do cenário2: município de Presidente Prudente/SP.	48
Figura 17 - Localização da área de estudo no município de Presidente Prudente-SP, com as possíveis falhas geológicas.....	50
Figura 18 - Imagem representativa das amostras de rochas coletadas em trabalho de campo, em diferentes pontos.	51
Figura 19 - Imagem representativa dos processo de secagem (A), de moagem em (B) e armazenamento em béquer Marinelli (C).	52
Figura 20 - Ilustração do sistema espectrométrico com detector de germânio de alta pureza: em (A) sistema completo, (B) câmara de baixo fundo cilíndrica (Castelo de Chumbo Iteco), em (C) o interior da câmara e a amostra inserida no sistema em (D).	54
Figura 21 - Imagem representativa do medidor AlphaGuard e bomba de gás acoplados ao contentor metálico onde está inserida a amostra.	55
Figura 22 - Ilustração dos procedimentos de perfuração e determinação da atividade de ^{222}Rn em rochas: (A) furadeira com broca de 80 cm; em (B) sonda metálica acoplada à bomba AlphaPump e medidor AlphaGuard e (C) marcação do furo após retirada da sonda.....	57
Figura 23 - Fórmula estrutural do monômero do detector de traço nuclear de estado sólido CR-39.....	57
Figura 24 - Malha de coletas indicando os 15 pontos no cenário 2.....	58
Figura 25 - Representação da implantação do CR-39.	59
Figura 26 - Equipamento da marca RADOSYS, modelo Radometer 2000 RSV10.	60

Figura 27- Ilustração das etapas da análise granulométrica conjunta.	62
Figura 28 - Fluxograma referente à metodologia de abertura das amostras.....	62
Figura 29 - Processador voltamétrico modelo 797 VA (Metrohm) e célula eletroquímica constituída por três eletrodos.	63
Figura 30 - Concentrações das atividades de ^{235}U para cada ponto de amostragem.	66
Figura 31 - Concentrações das atividades de ^{238}U para o conjunto de pontos de amostragem, em (A) os pontos vão de P1 a P33; em (B) excluiu-se o ponto P28.	67
Figura 32 - Concentrações das atividades de ^{235}Th para cada ponto de amostragem.....	68
Figura 33 - Representação gráfica da razão Th/U.	70
Figura 34 - Croqui da área de coleta em Sangemil, com indicação dos lineamentos das falhas geológicas (linhas azuis), e os pontos com seus respectivos valores de exalação de ^{222}Rn geogênico.	74
Figura 35 - Determinação do coeficiente de correlação de Person.	82
Figura 36 - Distribuição dos valores de atividade de Rn, concentração de Pb e posição em relação a falha geológica para os pontos do cenário 2.....	88
Figura 37 - Mapa de <i>Kernel</i> para a distribuição de chumbo em relação ao distanciamento da falha geológica.....	90
Figura 38 - Mapa de <i>Kernel</i> para a distribuição dos valores de atividade de Rn em relação ao distanciamento da falha geológica.	90
Figura 39 - Determinação do coeficiente de correlação de Person para as variáveis concentração de Pb e atividade de rn para o cenário 1.....	92
Figura 40 - Determinação do coeficiente de correlação de Person para as variáveis concentração de Pb e atividade de rn para o cenário 2.....	93

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dose média de radiação e suas respectivas fontes.....	19
Tabela 2 - Classe e diâmetro das partícula de acordo com as normas da ABNT.....	36
Tabela 3 - Valores orientados para chumbo em solos brasileiros, conforme Resolução CONAMA.....	41
Tabela 4 - Valores orientados para chumbo em solos brasileiros.....	42
Tabela 5 - Valores orientados para chumbo segundo Ministério de Ambiente de Ontário.....	42
Tabela 6 - Parâmetros metodológicos para aplicação da técnica voltamétrica.....	65
Tabela 7 - Valores das concentrações das atividades dos elementos U^{235} , U^{238} e Th^{232}	67
Tabela 8 - Razão entre ($^{238}U/^{230}Th$) para cada ponto de amostragem.....	71
Tabela 9 - Teor de exalação de ^{226}Ra , ^{222}Rn e coeficiente de emanação (E).....	73
Tabela 10 - Exalação de ^{222}Rn para cada ponto, média de exalação e quantidade de furos.....	75
Tabela 11 - Valores de atividade de Rn, U total e U^{238}	77
Tabela 12 - Valores aferidos para atividade de Rn no cenário 2.....	78
Tabela 13 - Valores de C_{Rn} para amostras de solo de diferentes regiões.....	78
Tabela 14 - Dados granulométricos referentes as amostras de solos.....	79
Tabela 15 - Valores de concentração de Pb total para os pontos de coleta do cenário 1.	81
Tabela 16 - Valores de concentração de Pb total, ^{210}Pb e ^{238}U para o cenário 1.....	82
Tabela 17 - Valores de concentração de Pb e desvio padrão para amostras de cenário 2.	84
Tabela 18 - Valores de concentração de Pb e fração de argila para os horizontes de cada perfil de solo do cenário 2.....	87
Tabela 19 - Valores de [Pb], atividade de Rn e fração de argila.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA: Agência Portuguesa do Ambiente

CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

FCT: Faculdade de Ciência e Tecnologia

GPES: Grupo de Pesquisa em Eletroanalítica e Sensores

HMDE: *Hanging Mercury Dropping Electrode*

HPGe: *High-Purity Germanium*

LRN: Laboratório de Radioatividade Natural

MPA: Material Particulado Atmosférico

OMS: Organização Mundial da Saúde

SI: Sistema Internacional de Unidade

SP: São Paulo

UNSCEAR: *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*

USEPA: *United States Environmental Protection Agency*

USGS: *United States Geological Survey*

VRQ: Valor de Referência de Qualidade

VP: Valor de Prevenção

LISTA DE SÍMBOLOS

Ag: Prata

AgCl: Cloreto de Prata

Bi: Bismuto

Bq: Becquerel

Ce: Cério

Co: Cobalto

CO₂: Gás Carbônico

Gy: Gray

HCl: Ácido Clorídrico

Hg: Mercúrio

HNO₃: Ácido Nítrico

H₂O₂: Peróxido de Hidrogênio

KCl: Cloreto de Potássio

N₂: Nitrogênio

NaNO₃: Nitrato de Sódio

Pb: Chumbo

Po: Polônio

Ra: Rádio

Rn: Radônio

Sv: Siervet

Th: Tório

U: Urânio

Sumário

1. Introdução	18
2.Revisão Bibliográfica	23
2.1Radônio e radioatividade natural	23
2.2 Unidades de medidas dosimétricas	26
2.3 Falhas geológicas: definição e características.....	27
2.4 Rochas ígneas e suas características radiológicas.....	32
2.5 Solos: definição e atributos.....	33
2.6 Chumbo: propriedades gerais, toxicidade e legislação	38
3. Justificativa e motivação	43
4. Objetivos.....	45
4.1 Objetivos gerais	45
4.2 Objetivos específicos	45
5. Metodologia.....	46
5.1 Considerações sobre as áreas de amostragem.....	46
5.1.1 Cenário 1	46
5.1.2 Cenário 2	48
5.2 Coleta e preparação das amostras de rochas e solos	51
5.3 Espectrometria com detector de germânio de alta resolução	53
5.4 Avaliação da emissão de radônio em contentores de metal.....	55
5.5 Perfuração das rochas e determinação da atividade de ^{222}Rn e ^{238}U <i>in situ</i>	56
5.6 Detector de Traços Nucleares de Estado Sólido - CR-39	57
5.6.1 Exposição dos detectores CR-39 no solo	58
5.6.2 Ataque químico ao CR-39 e contagem dos traços	59
5.7 Análise Granulométrica das amostras de solos.....	60
5.8 Pré-tratamento das amostras para análise eletroquímica	62
5.9 Análise via voltametria de redissolução anódica	63
5.10 Análise Estatística.....	64
6. Resultados e discussão	65
6.1 Determinação das concentrações de U e Th.	65
6.2 Correlação entre concentração de atividade de ^{238}U e ^{230}Th	69
6.3 Relação de ^{226}Ra e ^{222}Rn	71
6.4 Atividade de ^{222}Rn e ^{238}U <i>in situ</i>	72
6.5 Atividade de ^{222}Rn no cenário 2.....	75
6.6 Avaliação granulométrica das amostras de solo	76
6.7 Concentração de Pb para o cenário 1	79
6.8 Concentração de Pb total nas amostras de solo do cenário 2.....	82

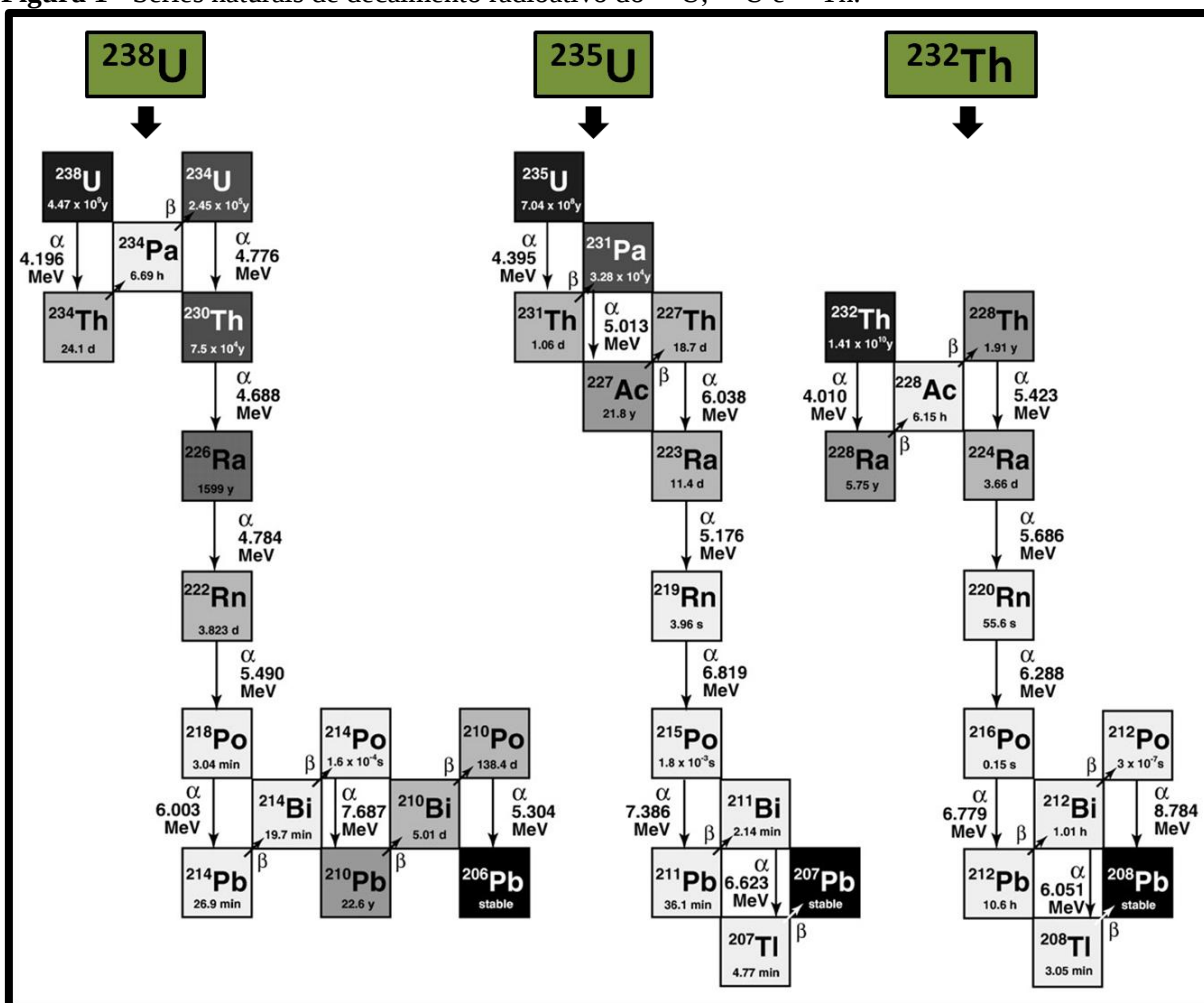
6.9 Relação entre concentração de Pb e fração de argila em amostras de solo do cenário 2.....	85
6.10 Relação entre concentração de Pb, fração de argila e atividade de Rn no cenário 1	87
6.11 Comparação entre concentração de Pb total para os cenários 1 e 2	91
6.12 Correlação de atividade de Rn e concentração de Pb total para ambos os cenários	91
7. Conclusão.....	94
8. Referências	96

1. Introdução

Ao se tratar dos diversos compartimentos que envolvem os problemas ambientais, a poluição causada por metais potencialmente tóxicos e elementos radioativos representa um dos temas mais relevantes justamente pelo quesito relacionando à periculosidade.

As fontes de radiação mais comuns às quais os seres humanos são expostos, provêm da radioatividade natural tanto da interação da radiação cósmica com a atmosfera como da crosta terrestre, que estão presentes na maior parte dos materiais geológicos, tendo em sua constituição elementos químicos radioativos como potássio (^{40}K), rubídio (^{87}Rb) e aqueles pertencentes às séries naturais de decaimento radioativo das famílias do urânio (^{235}U e ^{238}U) e do tório (^{232}Th) [1], conforme ilustração da Figura 1.

Figura 1 - Séries naturais de decaimento radioativo do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th .



Fonte: Adaptado de UNSCEAR, 2000 [2].

Pode-se verificar a relevância qualitativa e quantitativa da exposição dos seres vivos ao gás radônio quando se considera a dose de radiação oriunda de todas as fontes de radiação natural presentes no meio ambiente. Segundo dados do *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR, 2000), os valores apresentados na Tabela 1, indicam que o radônio e seus produtos de decaimento produzem cerca de 2/3 da dose efetiva oriunda das fontes naturais, apresentados pela média das doses anuais e individuais, expressas em microsievvert (μSv) [2].

Tabela 1 - Dose média de radiação e suas respectivas fontes.

Fonte	Dose efetiva anual (mSv)
Cosmogênita	15
^{40}K	180
^{87}Rb	6
^{226}Ra	19
^{214}Po	1100
^{210}Po	120
^{208}Th	160
Total	1600

Fonte: Adaptado de UNSCEAR, 2000[2].

O radônio é produzido no interior de rochas, e consequentemente em solos, que contenham em sua composição os elementos urânio (U) e rádio (Ra) e seus produtos de decaimento radioativo em equilíbrio secular. Por isso, estudos envolvendo análise de solos e rochas, quando se trata de radioatividade natural, adotam preferencialmente regiões caracterizadas com falhas geológicas [3-5].

Denominadas também de falhamentos geológicos, são descontinuidades formadas pela fratura das rochas superficiais da Terra (até cerca de 200 km de profundidade) quando as forças tectônicas superam a resistência das rochas.

Segundo Zarroca et al., as análises de gases emanados do solo (^{222}Rn , ^{220}Rn e CO_2) através de técnicas como tomografia de resistividade elétrica e refração sísmica, quando comparadas com os diferentes dados geoquímicos, geofísicos, hidrogeológicos das regiões, permitem concluir que os gases radônio e carbônico são liberados em maior quantidade em zonas de falhamento geológico [6].

Justamente pela característica intrínseca de liberarem maior quantidade de gás Rn, as regiões de falhas geológicas também podem ser alvo de estudos voltados à quantificação de metais, principalmente de chumbo (Pb) e bismuto (Bi) por estarem inseridos na série natural de decaimento radioativo do urânio e por isso são considerados radionuclídeos ou filhos de radônio [7, 8].

As concentrações desse metais nos solos e rochas, podem ser influenciadas por outros fenômenos naturais, como erupções vulcânicas, redistribuição por ação eólica ou hídrica [9, 10] ou por ações antropogênicas, como disposição de resíduos no solo, mineração, metalurgia, queima de resíduos, uso de fertilizantes, corretivos e outros insumos agrícolas [11, 12].

Portanto, dependendo da região a ser estudada, pode existir variadas fontes de liberação de urânio, tório, rádio, radônio e consequentemente de chumbo, por ser o elemento químico mais estável da série natural de decaimento radioativo do U. Por isso, estudos que visam diagnosticar o potencial radioativos e as concentrações de metais tóxicos torna-se cada vez mais importantes e necessários independente do território a ser explorado.

Quanto ao continente Europeu, existem alguns dados importantes relativos à Portugal no que concerne ao gás radônio. Teixeira e Faísca [13] efetuaram um levantamento preliminar das concentrações de radônio no ar do interior das habitações do território continental português, numa base de amostragem aleatória, o qual conduziu à detecção superior a 8% de habitações com valores superiores a 200 Bq.m⁻³ e 3% superiores a 400 Bq.m⁻³. As maiores concentrações de Rn foram encontradas em distritos cujo substrato geológico é majoritariamente constituído por granitos, que são efetivamente, dentre a diversidade de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares que ocorrem no planeta, a variedade lítica que normalmente incorpora os mais elevados teores de urânio.

Em Castelo Branco, região central de Portugal, avaliou-se o teor de U e Th em mais de 50 pontos representativos, conforme avaliação prévia do fundo radiométrico dos principais litótipos aflorantes presentes na área. Os teores de Th enquadraram-se em um intervalo de 0 até 28 partes por milhão (ppm), onde os valores mais elevados

correspondem a bancadas de quartzitos provavelmente enriquecidas por minerais como zircão¹ e monazita², em áreas típicas de falhas geológicas [14].

Os teores de U variaram entre 2 e 14 ppm, sendo os mais elevados correspondentes à áreas de rochas graníticas. Em geral, atribui-se às rochas graníticas um potencial acrescido de Rn em relação a outras litologias devido a sua composição ter maior concentração em urânio.

Ressalta-se o fato de que em Portugal, as áreas urbanas onde têm sido detectadas concentrações elevadas de gás Rn, localizam-se em regiões de substrato majoritariamente de natureza granítica [15-17].

Ainda em Portugal, na região de Guarda, verificou-se a importância de estudos dosimétricos de elementos radioativos em habitações, isso devido a existência de falhas geológicas que proporcionam um teor radiométrico anômalo.

O granito de grão médio a grosseiro abundante nessa região proporciona a existência de elevados teores de U e Th, que combinado com a geomorfologia e condições meteorológicas do local favorecem elevada concentração de Rn nas habitações ocupadas pela população. Os valores médios de concentração de Rn são superiores a 400 Bq.m^{-3} , indicando que tal localidade possui um dos valores mais elevados de concentração de Rn e filhos de radônio no país [15, 18].

Ao se tratar de estudos voltados ao continente Americano, o Brasil ainda pouco destaca-se quanto as pesquisas voltadas à radioatividade natural, além disso é importante ressaltar os déficits da legislação que estabelece normas de base relativas à radiação.

Contudo, ainda pode-se relatar importantes estudos voltados a quantificação e identificação de Rn e filhos, como por exemplo no estado de Santa Catarina onde verificou-se valores superiores a 1000 Bq.m^{-3} em minas subterrâneas de fluorita [19].

Esse valor considerado elevado pode ser justificado devido à ineficiência do sistema de ventilação das minas, mesmo assim, segundo estudo os trabalhadores estão expostos a uma dose efetiva média na ordem de 12 mSv/a que não extrapola o valor limite determinado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) [20].

¹ Zircão: mineral presente em muitas rochas ígneas (como produto primário da cristalização), em rochas metamórficas (como grãos recrystalizados) e rochas sedimentares (como grãos detríticos). O seu tamanho médio no granito varia de 100 a 300 μm .

² Monazita: mineral fosfato que têm em sua composição teor de cério, lantanídeo e tório, sendo que último pode chegar a 30% da composição total do mineral.

Segundo Vasconcelos [21], os resultados de análises dosimétricas em amostras de areia em praias do extremo sul da Bahia, indicaram que das sete localidades estudadas apenas duas (praias de Alcobaça e Cumuruxatiba) apresentaram os valores de atividades específicas do ^{238}U elevados, com a dose efetiva anual acima de 18 mSv/a. Com esse teor elevado de radiação, concluiu-se que em tais praias os valores médios de radiação superam até mesmo os valores médios mundiais.

Ainda no estado da Bahia, na região de Irecê (centro norte do estado), foram realizados estudos dosimétricos correspondentes à atividade gama total em solos e rochas aflorantes. Percebeu-se, segundo dados obtidos, que as rochas calcárias da região apresentavam baixos teores de U e relativamente elevados de Th, enquanto que para amostras de solos observou-se uma tendência de enriquecimento dos elementos radioativos, justificados principalmente pela absorção desses por frações de argilas típicas em solos [22].

No município de Lucrecia, Rio Grande do Norte, verificou-se a atividade de gás radônio em regiões formadas por rochas metamórficas de composição granítica e carbonática. Em todas as habitações estudadas, durante o período de medições, os valores de exalação de Rn ultrapassaram o limite máximo permitido pela Organização Mundial da Saúde (OMS) que é de 100 Bq/m^3 . Esses resultados estão atrelados ao fato da região estar inserida em uma importante área mineira geologicamente conhecida como Província Mineira da Borborema [23].

Sendo assim, tanto o território brasileiro quanto de Portugal mostram-se aptos a serem investigados e monitorados quanto ao teor de emissão de gás radônio e filhos de Rn, onde poderá se explorar o fator da radioatividade natural, intrínseco em ambas as regiões.

2.Revisão Bibliográfica

2.1Radônio e radioatividade natural

As fontes de radiação naturais são aquelas que, necessariamente, não foram originadas por ações antropogênicas . A radioatividade natural tem como fonte principal os radionuclídeos presentes na crosta terrestre, denominados de radionuclídeos primordiais ou os radionuclídeos produzidos pela interação dos raios cósmicos com a atmosfera (radionuclídeos cosmogênicos) [24].

Quanto a representação dos radionuclídeos primordiais, existem algumas séries naturais de decaimentos radioativos, que são: a série de decaimento radioativo natural do ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e ^{40}K , que apresentam abundância natural de 99,3%, 0,72%, 100% e 0,01%, respectivamente [25].

As séries do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th são iniciadas a partir de um isótopo de urânio ou tório, que sofre decaimento de seu núcleo preferencialmente por emissões de partículas alfa e/ou beta, finalizando as séries em um isótopo estável do chumbo (^{206}Pb).

Quando se quantifica ^{238}U em amostras ambientais como o solo, ele decai, via decaimento alfa, para ^{234}Th que gera raios gama de baixa energia com probabilidade de emissão muito baixa.

No entanto, é importante ressaltar que os limites de detecção de vários radionuclídeos variam muito dependendo da matriz em que se encontram. Os limites de detecção de radionuclídeos emitindo raios gama de baixa energia (menor que 100keV) sofrem possível interferência por estarem em uma matriz contendo outros radionuclídeos, que emitem raios gama de maior energia devido influências dos raios X e raios gama dispersos.

Portanto, para quantificar tais emissões, com baixos limites de detecção, podem ser usado espectrometria de partículas alfa e espectrometria de massa. No entanto, a fim de economizar tempo na preparação e análise de amostras, é muito comum aferir ^{238}U usando espectrometria de raios gama [26].

As transições de raios γ em ^{234}Th , ou seja, após os decaimentos β de ^{234}Th e se filho ^{234}Pa , são usados para identificação e quantificação de ^{238}U . Para isso é necessário assegurar que o equilíbrio secular exista entre o ^{234}Th e o ^{238}U .

Em amostras de urânio puro, os limites de detecção (em mBq) são baixos e os seguintes raios gama podem ser usados: 63keV, 92.5keV , 767keV e 1001keV. Os raios gama em 767 e 1001keV são robustos para a quantificação, mas devido às suas baixas

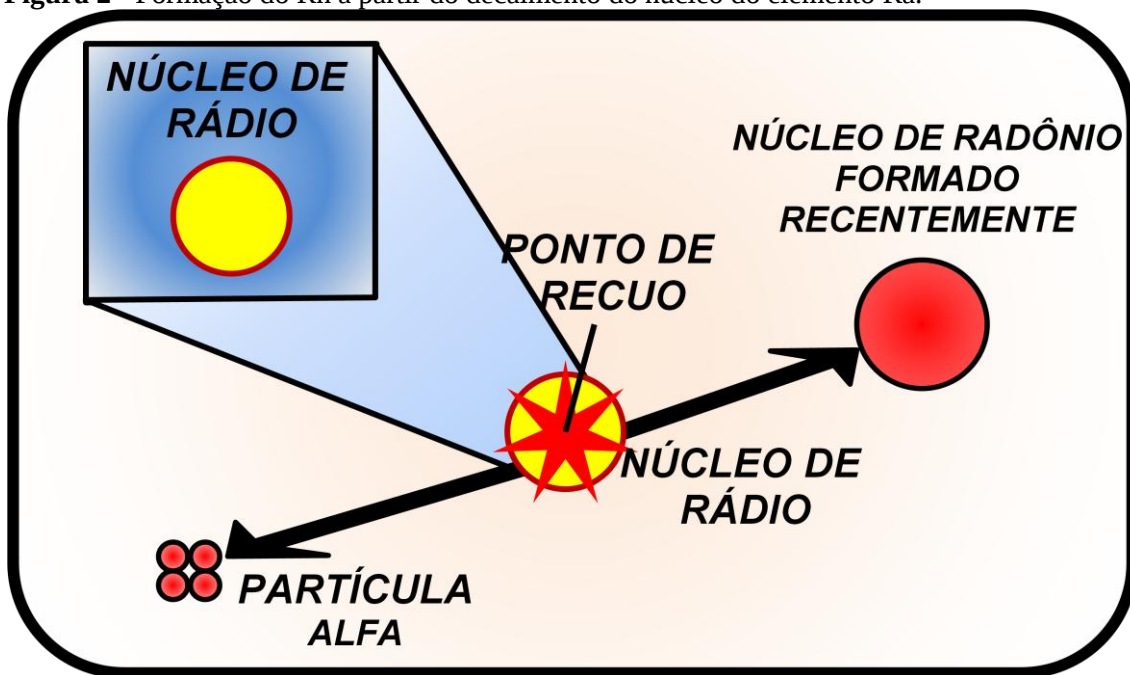
probabilidades de emissão (0,317% e 0,842%, respectivamente), eles são frequentemente inundados pelo fundo de outros radionuclídeos na própria amostra. Assim, é necessário usar as duas linhas gama de baixa energia [26].

Ressalta-se também alguns elementos importantes, inseridos nessas séries de decaimento, quanto às propriedades radioativas: rádio e radônio.

O comportamento geoquímico do rádio é caracterizado por possuir isótopos com elevada solubilidade e meia-vida que pode variar, tanto na série do ^{238}U (^{226}Ra , $t_{1/2} = 1620$ anos) e ^{235}U (^{223}Ra , $t_{1/2} = 11,68$ dias) como na do ^{232}Th (^{228}Ra , $t_{1/2} = 6,7$ anos e ^{224}Ra , $t_{1/2} = 3,64$ dias).

Compreende-se que os átomos de rádio presentes em alguns minerais sofrem decaimento e são liberados de suas matrizes sólidas ejetando uma partícula alfa (dois prótons e dois nêutrons), conforme ilustração da Figura 2. Então o átomo de radônio formado tem um recuo significativo que proporciona sua liberação ou não do grão do mineral.

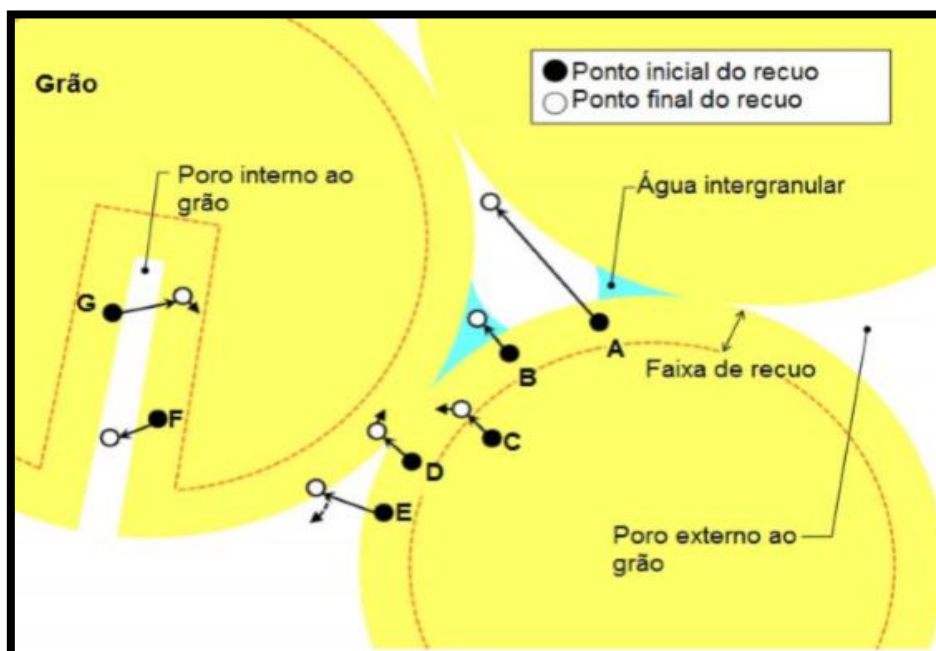
Figura 2 - Formação do Rn a partir do decaimento do núcleo do elemento Ra.



Fonte: Adaptado de Otton et al., 1995 [27].

Se o átomo de rádio encontrar-se localizado muito internamente na estrutura mineral, dificilmente o Rn será exalado, ou seja, liberado para a atmosfera. Por outro lado, o Rn gerado pode estar localizado próximo à superfície de outros grãos e a espaços (poros) ocupados por ar ou água, conforme ilustração da Figura 3.

Figura 3- Representação dos grãos, poros, pontos iniciais e finais dos elementos formados por decaimento radioativo em rochas.

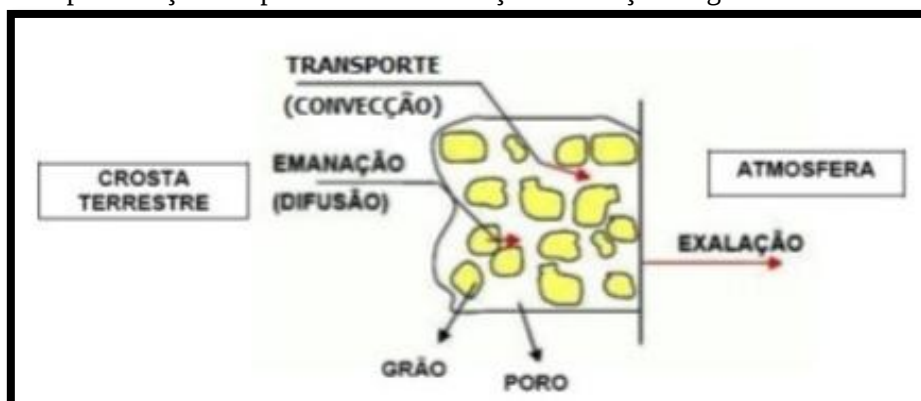


Fonte: Adaptado de Otton et al., 1995 [27].

Dependendo da sua direção de recuo, o Rn pode-se difundir para outro grão, para os poros entre os grãos e até mesmo para planos de fraturas existentes naturalmente nas rochas. Tal processo é denominado de emanação do gás radônio, conforme representação da Figura 4.

Os átomos de radônio que entram nesses poros ou fraturas intersticiais são transportados por difusão e advecção através desses espaços até que decaiam e estabilizem-se no último elemento da série de decaimento radioativo (^{206}Pb) ou serão liberados para a atmosfera, no processo denominado exalação do gás radônio (Figura 4).

Figura 4- Representação dos processos de emanação e exalação de gás Rn.



Fonte: Adaptado de Portendorf, 1993 [28].

Fatores como a quantidade de água presente nos poros dos grãos (umidade), porcentagem de poros existentes (porosidade) e distância entre os grãos (permeabilidade) controlam a velocidade com a qual o Rn se desloca no solo.

Considera-se que aproximadamente 1% do radônio total gerado dentro das rochas migre para seus poros e fraturas, portanto em agregados de grãos minerais, o poder de emanção é normalmente da ordem de 1%, a menos que exista água ou outros líquidos presentes nos interstícios, fraturas e capilares que absorvam a energia cinética do Rn recuado no momento do decaimento α do Ra. Assim, o teor de umidade da maioria dos solos é suficiente para garantir o poder de emanção maior que 1% [29].

Experimentalmente, adotando-se processos de difusão e testes em campo foi possível indicar que a distância média entre a fonte de origem do ^{222}Rn até que ele decaia é de aproximadamente 8,0 metros no solo, e é denominada de distância de migração [30].

Em função da dinâmica do gás radônio ele pode se dispersar na atmosfera, ou se acumular em diversos ambientes e/ou ser aprisionado na água, caso entre em contato com a mesma. Essas são as prováveis vias de transporte do gás radônio até a interação com o ser humano, podendo assim, acarretar possíveis danos à saúde.

2.2 Unidades de medidas dosimétricas

As unidades de medidas dosimétricas são grandezas que compõem os parâmetros voltados aos processos de quantificação e interação da radiação, corpuscular ou eletromagnética, com a matéria [30].

Quando se trata de dose absorvida, tem-se o quociente de $d\bar{E}$ por dm , definida pela Equação 1:

$$D = d\bar{E}/dm \quad (1)$$

onde $d\bar{E}$ é a energia média depositada pela radiação ionizante na matéria e dm é massa da matéria.

Sua unidade no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Gray (Gy), onde $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$. Na literatura, ainda pode-se encontrar sua representação em outra unidade, um pouco mais antiga, denominada de rad (*radiation absorbed dose*), onde $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.

Ao se tratar da taxa de dose absorvida, deve-se considerar o intervalo de tempo de exposição à radiação. A equação 2 define a taxa de dose absorvida:

$$D = dD/dt \quad (2)$$

onde dD é o incremento da dose absorvida num dado intervalo de tempo dt , e sua unidade é (Gy s^{-1}) ou (rad s^{-1}).

Para medidas ambientais de radiação gama no ar, outra unidade pode ser adotada, o Sievert (Sv), onde $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$. Tal grandeza é muito utilizada no campo da proteção radiológica para indicar os efeitos biológicos da exposição à radiação ionizante [27].

Quando um material radioativo apresenta uma determinada desintegração por tempo, tem-se o valor de atividade que de acordo com o Sistema Internacional (SI) a unidade é referenciada em Becquerel (Bq).

2.3 Falhas geológicas: definição e características

As estruturas geológicas estão ligadas intrinsecamente às formas e posicionamentos dos corpos rochosos e podem ser representadas por xistosidade, dobras, fraturas, falhas e acamamento de rochas sedimentares, que por fim provocam zonas de fraqueza ou ruptura.

Estudos neotectônicos podem levar a identificação de falha geológica, que segundo a United States Geological Survey (USGS) é uma fratura ao longo da qual os blocos da crosta terrestre, em ambos os lados, moveram-se um em relação ao outro paralelamente à fratura [31].

As falhas geológicas ou falhamentos geológicos podem ocorrer como um único plano (falhas discretas). No entanto, quando a rocha sofre processos de falhamentos repetidos, ou quando a rocha apresenta baixa resistência, observa-se não apenas uma falha única, mas uma zona de falha composta por inúmeras superfícies de falhas subparalelas e interconectadas [32].

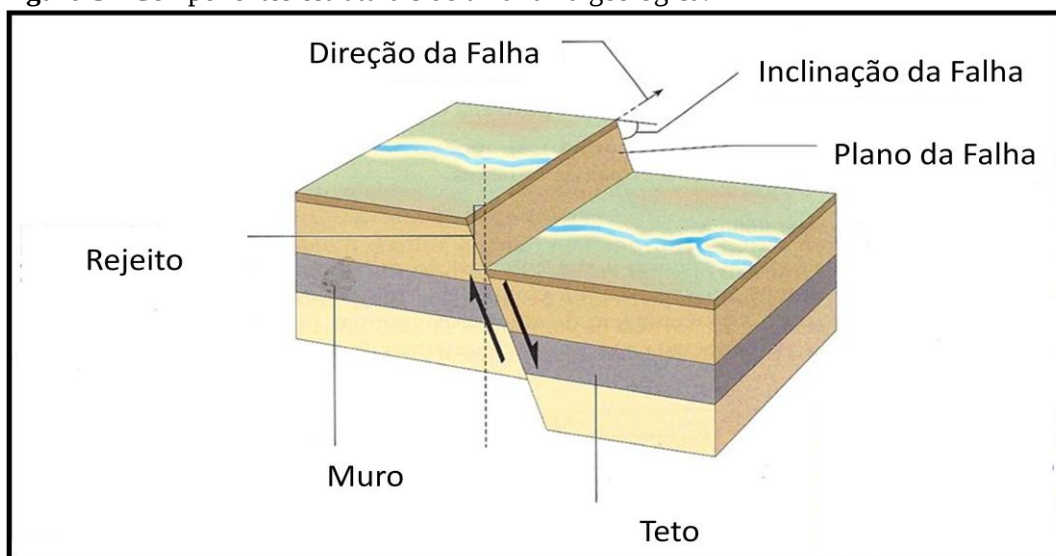
De acordo com Davis & Reynolds, as zonas de falha são regiões onde ocorreram fraturamentos e esmagamentos intensos da rocha mãe, podendo variar de espessura em centímetros até quilômetros [33].

O processo de falhamento, tanto para falhas discretas quanto para zonas de falha, depende de diversos fatores como: resistência da rocha, taxa de deformação, ambiente físico de deformação e a duração do processo. Qualquer variação de forma ou volume quando sujeitas à ação de pressão, tensão, variação de temperatura, dentre outros, também podem ser consideradas deformações da rocha.

Ainda sobre o processo de falhamento, é importante citar o termo "rocha de falha" que é uma estrutura formada durante esse processo. É formada pelos processos concomitantes de esmagamento e fragmentação da rocha e dos minerais. Está diretamente relacionado com o intenso fraturamento e deslizamento friccional ao longo das microfissuras durante os movimentos da falha.

Existem alguns elementos que envolvem a estrutura geológica de uma falha, e que devem ser bem definidos, como por exemplo: i) plano de falha: superfície ao longo do qual se deu o deslocamento; ii) zona ou espelho de falha: faixa que acompanha o plano de falha, representada por um fraturamento ou esmigalhamento intenso da rocha; iii) linha de falha: é a linha formada pela interseção do plano de falha com a topografia; iv) rejeito: é a medida do deslizamento linear resultante do movimento que ocasionou a falha; v) capa ou teto: bloco que fica acima do plano de falha (inclinado); vi) lapa ou muro: bloco que fica abaixo do plano de falha (inclinado) [33]. A Figura 5 ilustra os elementos que envolvem a estrutura física da falha geológica.

Figura 5 - Componentes estruturais de uma falha geológica.



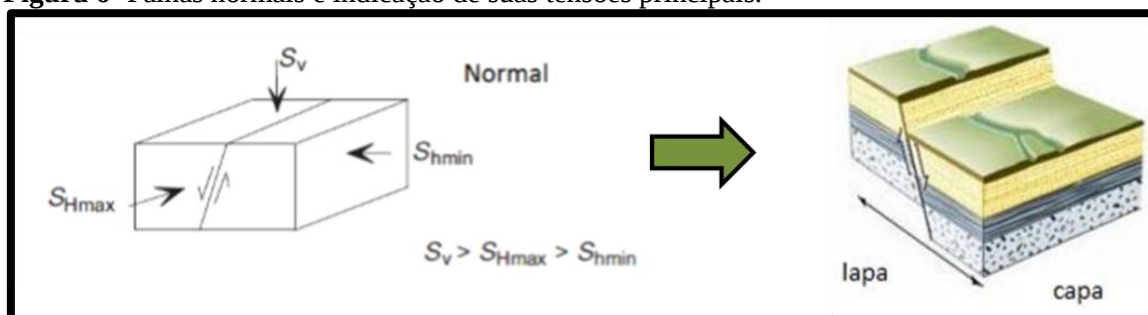
Fonte: Adaptado de Rutqvist (2002) [34].

O comprimento inicial da falha é o principal controlador na determinação do transporte de fluido e distribuição de deformações entre as falhas. Estudos revelam que as falhas mais longas tendem a acomodar maiores deformações cisalhantes e gerar maiores deslocamentos em relação as falhas mais curtas, tornando-se um meio mais efetivo para transporte de fluídos [35].

Além da estimativa do comprimento das falhas geológicas, que indica características importantes como fluidez e deformação, a análise da dinâmica do processo de formação dessas estruturas pode classificá-las em três regimes diferentes: falha normal, falha reversa e falha transcorrente.

As falhas normais, também chamadas de falhas diretas, ocorrem em ambientes extensionais, sendo as estruturas predominantes na formação dos limites de placas divergentes. É importante considerar a magnitude das tensões principais (horizontais e verticais) que atuam nas falhas. Nesse caso, a magnitude da tensão vertical (S_v) é maior em relação às tensões horizontais (S_h e S_H), fazendo com que a capa (teto) se movimente para baixo em relação à lapa (muro), conforme esquema da Figura 6.

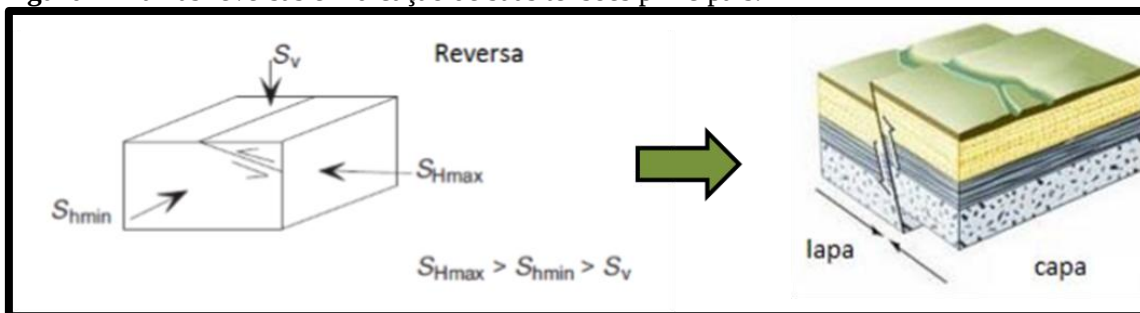
Figura 6- Falhas normais e indicação de suas tensões principais.



Fonte: Adaptado de Rutqvist (2002) [34].

Nos planos da falha reversa, as rochas são fortemente deformadas fazendo com que haja formação de "rochas de falha". Podem ocorrer em qualquer ambiente compressivo ou convergente com rochas de comportamento frágil [35]. Nesse regime de falha reversa ocorre um movimento aparente onde a capa ascende em relação à lapa, e isso é resultado da magnitude da tensão aplicada verticalmente ser menor que as tensões horizontais, de acordo com a Figura 7.

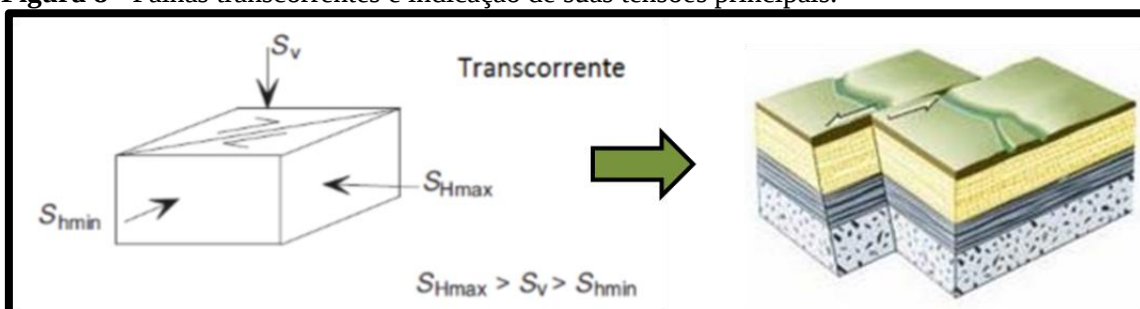
Figura 7- Falhas reversas e indicação de suas tensões principais.



Fonte: Adaptado de Rutqvist (2002) [34].

As falhas transcorrentes, geralmente são verticais e acomodam cisalhamento horizontal paralelo a direção do plano de falha. Seus deslocamentos são definidos em movimentos destrais (lateral para direita) e sinistrais (lateral para esquerda) conforme ilustração da Figura 8.

Figura 8 - Falhas transcorrentes e indicação de suas tensões principais.

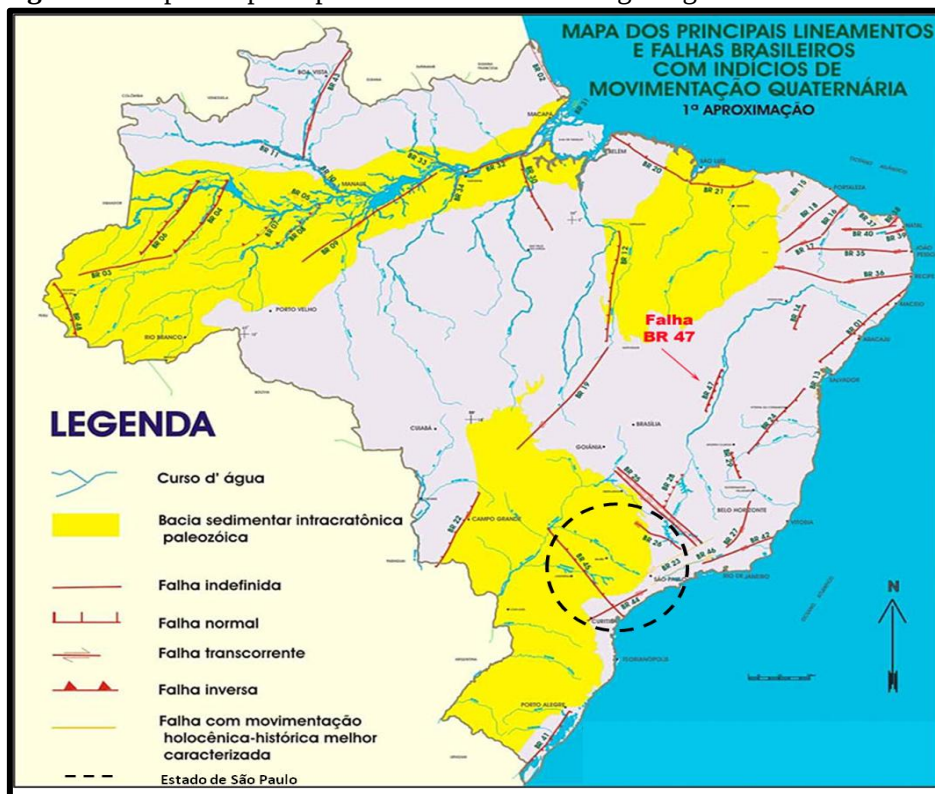


Fonte: Adaptado de Rutqvist (2002) [34].

No território brasileiro, um importante estudo realizado por Saadi, culminou com o desenvolvimento do primeiro mapa neotectônico do Brasil (Figura 9). Para tal foi necessário um amplo levantamento de mapas topográficos e geológicos das macro e micro regiões, além de imagens de satélite e radares [36].

Concluiu-se, nesse estudo, que o maior número de falhas se concentra nas regiões sudeste e nordeste, seguidas pela região norte e centro-oeste. Já a região sul do Brasil é a que apresentou o menor número de falhas geológicas conforme observa-se na Figura 9, onde destacou-se o estado de São Paulo.

Figura 9- Mapa dos principais lineamentos e falhas geológicas do território brasileiro.



Fonte: Adaptado de Saadi, 1999 [36].

A região de Presidente Prudente, localizada no estado de São Paulo, apresenta fortes indicativos da localização e direção de falhas geológicas soterrada a aproximadamente 200 m de profundidade sendo uma característica marcante de regiões onde há fontes geotérmicas [37].

É muito provável que essas falhas estejam vinculadas com outras, que se mostram na superfície através de córregos, existentes no município de Presidente Prudente/SP, que por sua vez podem estar ligadas a falhas mais importantes que atravessam praticamente todo o interior do estado de São Paulo [38].

No contexto tectônico global o território português encontra-se situado na placa litosférica eurasiática, junto à margem continental ibérica a oeste e a leste tem-se a fronteira entre a placa eurasiática e a placa africana, materializada pela Zona de Fraturação Açores-Gibraltar, que se estende entre o ponto triplo dos Açores e a região de Gibraltar, apresentando comportamentos tectônicos distintos ao longo da sua extensão [39].

No setor oriental e, em particular, no Golfo de Cádiz, existe uma faixa de deformação que é distribuída por diversas falhas, conforme ilustração da Figura 10, que foram identificadas no seguimento de estudos de geologia marinha.

Figura 10- Mapa dos principais lineamentos e falhas no território português.



Fonte: Adaptado de Cabral, 1988 [40].

2.4 Rochas ígneas e suas características radiológicas

As rochas ígneas se originam a partir de agregados de minerais produzidos pelo resfriamento e solidificação de um material fundido que é gerado profundamente no manto ou na crosta inferior da Terra [41].

São consideradas como rochas primárias uma vez que são formadas pelo processo de fusão e resfriamento do magma primário. O magma, simplificado, é composto por uma mistura complexa de silicatos, gases e cristais já solidificados.

A variedade de rochas ígneas está diretamente relacionada ao magma, mais especificamente no processo ao qual é submetido, desdobrando-se em frações de composição diferente. Nesse processo, a temperatura é essencial, uma vez que a diferenciação das rochas dá-se pelo resultado do fracionamento da cristalização do

magma. Ressalta-se que a associação típica de certos minerais acontece exclusivamente pela temperatura de cristalização.

Desta forma, as rochas ígneas apresentam uma considerável variação em função da textura, composição química e mineralógicas, além das condições petrográficas e estruturais. Portanto, ao se tratar da abundância de urânio e tório nestas rochas, além da concentração inicial, é necessário também compreender a história pós-cristalização das rochas.

Os tipos mais abundantes de rochas ígneas são: basalto, gabro, andesito, diorito, riólito e granito. Na maioria delas, a radioatividade provém principalmente de minerais acessórios levemente radioativos como apatita e zircão. Existem outros minerais acessórios que são altamente radioativos, no entanto são mais escassos, os quais pode-se citar a monazita, alanita, uraninita, torita, dentre outros [42].

Em geral, maiores concentrações de radionuclídeos são mais comuns em rochas ígneas quando comparadas às sedimentares, onde os elementos mais disponíveis e contribuintes para tal característica são ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K . Tais elementos encontram-se concentrados preferencialmente nas rochas ígneas ácidas, em relação às intermediárias, básicas e ultrabásicas [2, 43, 44].

O mineral denominado uraninita (UO_2), é caracterizado por apresentar maior concentração de urânio, no entanto feldspatos e quartzos também são representantes de minerais constituídos pelo elemento radioativo em menor quantidade e são constituintes de muitas rochas.

O tório, que possui o maior raio atômico dos cátions tetravalentes, ocorre em minerais puros com a torianita (ThO_2) ou torita (ThSiO_2) e também na monazita [(Ce, La, Nd, Th) PO_4], sendo as duas primeiras mais raras que a última quando se trata da presença em rochas [45].

2.5 Solos: definição e atributos

A fração da ciência que se dedica ao estudo dos solos é denominada de pedologia, surgiu no final do século XIX, e baseia-se em metodologia científica empírica com constantes propostas e debates quanto à definição do termo "solo" e suas potencialidades [46].

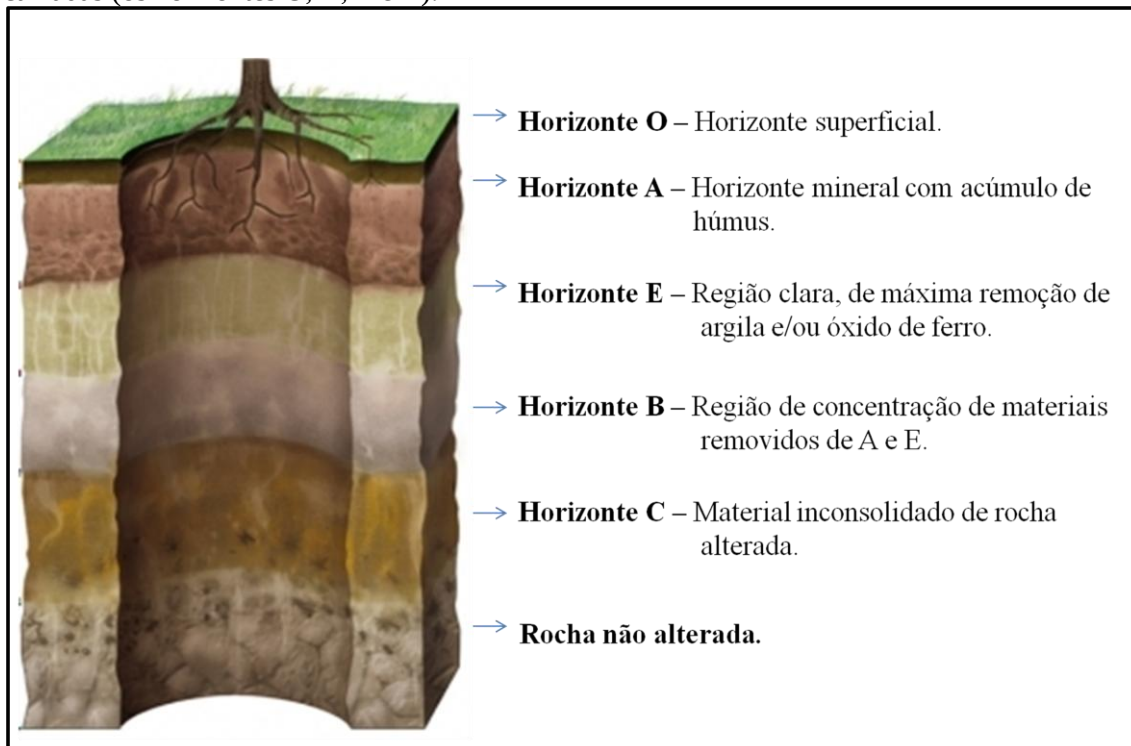
Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCA), considerado o sistema taxonômico oficial de classificação de solos do Brasil, define-se solo como:

O solo que classificamos é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contêm matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem e, eventualmente, terem sido modificados por interferências antrópicas [47].

A análise das propriedades dos solos, como textura, estrutura, porosidade, cor, pH, teor de matéria orgânica, dentre outras; é muito importante para sua identificação e descrição, pois um solo pode diferir de outro dentro de um mesmo perfil.

O perfil constitui uma seção vertical das camadas do solo, desde a superfície até a rocha matriz, dividindo-se em horizontes, conforme ilustração da Figura 11. No horizonte "O" situa-se na superfície onde os minerais e colóides podem ser removidos por lixiviação. O horizonte "B" forma um patamar de acumulação para os materiais lavados do horizonte "A" e "E". O horizonte "C" é o menos alterado, encontra-se em uma zona profunda de depósitos geológicos brandos ou rochas. O último horizonte é chamado também de rocha matriz, e constitui a base do perfil [48].

Figura 11- Representação esquemática da rocha (R) e do regolito (tudo que esta acima da rocha). O regolito subdivide-se em saprólito (C) e solum, que, por sua vez, é composto de várias camadas (os horizontes O, A, E e B).



Fonte: Adaptado de Lepsch, 2011[49].

Na composição dos solos inclui-se materiais orgânicos e inorgânicos, onde estão inseridos os minerais. A matéria mineral que constitui o solo tem origem na rocha parental. Durante o processo de alteração da rocha e de formação do solo, os minerais oriundos da rocha podem ser transformados em outros minerais, podem ser completamente perdidos ou até mesmo resistirem ao processo e manterem-se semelhantes à composição da rocha parental. Os processos de alterações sobre a rocha parental, podem ser químicos e físicos, e são denominados de intemperismo.

O intemperismo físico é composto por processos que levam à fragmentação da rocha, sem modificação expressiva em sua estrutura química ou mineralógica. Em contrapartida, intemperismo químico é o conjunto de reações que levam à modificação dos minerais componentes da rocha e é predominante em períodos mais úmidos.

Na natureza, é praticamente impossível, separar o intemperismo físico do intemperismo químico, pois dependendo das condições climáticas e geológicas ocorrem simultaneamente. O intemperismo químico, entretanto, torna-se mais acelerado à medida que o intemperismo físico avança, devido ao aumento de área superficial específica dos minerais [50].

Esses fatores se combinam de formas variadas e dão origem aos processos de formação de solos, imprimindo diversificadas características morfológicas (cor, estrutura, consistência, cerosidade, espessura, etc) que podem ser identificadas em trabalhos de campo, e no laboratório, através de análises para determinação da humidade, do teor de matéria orgânica, da presença de metais e da granulometria, que permitem completar os dados verificados em campo.

Ao considerar a fase sólida dos solos, sabe-se que seu conteúdo é variável de acordo com os diferentes tamanhos de partículas e suas proporções. A determinação do tamanho das partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrência, ou seja, sua análise textural, permite obter a função de distribuição de partículas do solo, chamada também de distribuição granulométrica.

Uma fração granulométrica representa uma classe de tamanho de partícula, que é definida por um limite superior e um limite inferior de acordo com a escala adotada. As classificações variam conforme as escalas adotadas pelas mais diversas instituições como a ASTM (American Society for Testing Materials), AASHTO (American Association for State Highway and Transportation Officials), ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e MIT (Massachusetts Institute of Technology). No

Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT/NBR 6502/95) [51], adota as seguintes convenções de nomenclatura e tamanho de partícula, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Classe e diâmetro das partícula de acordo com as normas da ABNT.

Fração Granulométrica	Diâmetro (mm)
Cascalho	20 - 2
Areia grossa	2 - 0,2
Areia fina	0,2 - 0,05
Silte	0,06 - 0,002
Argila	< 0,002

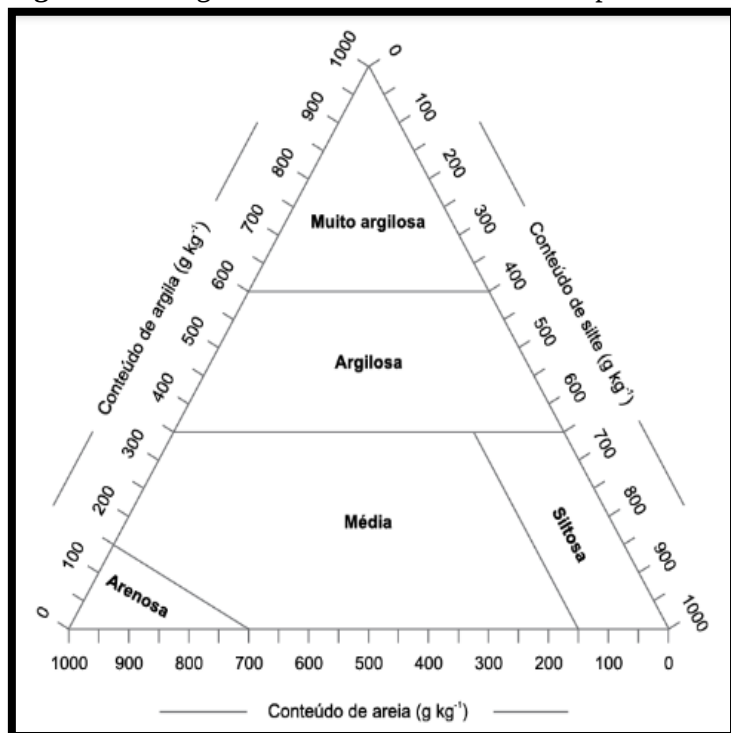
Fonte: Adaptado de *ABNT/NBR 6502, 1995* [51].

Dentre as partículas que podem formar os diferentes tipos de solos, destacam-se:

- **Areia:** solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm. De acordo com o diâmetro classificam-se em: areia fina, média e grossa;
- **Silte:** apresenta baixo ou nenhuma plasticidade, baixa resistência quando seco ao ar. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm.
- **Argila:** constituída por partículas com dimensões menores que 0,002 mm. Apresentam características marcantes de plasticidade; quando suficientemente úmido, molda-se facilmente em diferentes formas, quando seco, apresenta coesão suficiente para construir torrões dificilmente desagregáveis por pressão dos dedos. Caracteriza-se pela sua plasticidade, textura e consistência em seu estado e umidade naturais.

Os valores das frações areia, silte e argila de uma amostra de solo, pode-se determinar sua classe de textura através da análise do Diagrama das Classes Texturais [48, 52]. A maioria das classificações texturais adota como sistema de representação gráfica o triângulo equilátero, onde em cada aresta estão dispostas as porcentagens de areia, argila e silte, de acordo com a Figura 12.

Figura 12 - Diagrama textural detalhado adotado pela EMBRAPA.



Fonte: Adaptado de Lemos e Santos, 1996 [52].

Devido a estas relações, é possível estruturar sistemas de classificação de solos. No Brasil, iniciou-se na década de 1950 uma classificação dos solos que perdurou até o ano de 1999. Surgiu nesse momento, a necessidade em promover estudos mais criteriosos com a finalidade de elaborar um Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), que buscou investigar, entender e organizar o conhecimento sobre os solos tropicais.

Nesse enredo, definições dos atributos (propriedades) e horizontes analisados na classificação dos solos, foram descritos em uma nova edição, denominada Segunda Edição do Novo Sistema de Classificação dos Solos, no ano de 2006, coordenado pela EMBRAPA [47].

A 3ª edição, do ano de 2013, continua a ser um sistema hierárquico de classificação e busca consolidar a sistematização taxonômica que expressa o conhecimento para a discriminação de classes de solos identificadas no Brasil. As alterações realizadas nesta terceira edição em relação a anterior compreendem desde mudanças nos critérios e conceitos de horizontes até a incorporação de classes de solos em nível categórico de subordem, grande grupo, subgrupo e família (totalizando cinco níveis categóricos).

Recentemente, no mês de agosto de 2018, a 5ª edição do SiBCS trouxe ajustes e correções de conceitos básicos relativos a definição de solo, caracteres e horizontes diagnósticos, bem como alterações de redação, redefinição da seção de controle, eliminação ou incorporação de classes de solos em todos os níveis categóricos .

Além da classificação atualizada dos solos para o território brasileiro, em pesquisa realizada pela EMBRAPA [47], intitulada "Antropossolos: proposta de ordem (1º aproximação)" é apresentada a ordem dos solos antropogênicos originados a partir da ação humana sobre as paisagens.

Para serem considerados antropossolos precisam apresentar as seguintes características ou condições diagnósticas:

- Inversão ou mistura de horizontes genéticos e/ou diagnósticos;
- Presença de materiais antrópicos;
- Remoção de horizontes do solo feitos pelo homem, de forma manual, por máquinas e/ou implementos;
- Modificação na paisagem ocasionada pelo homem através da ação de máquinas e/ou implementos;
- composição granulométrica ou química modificada;
- presença de materiais tóxicos e/ou sépticos.

Nesse sentido, os antropossolos são conceituados como:

Compreende volume formado por várias ou uma camada antrópica desde que possua 40 cm ou mais de espessura, constituído por material orgânico e/ou inorgânico, em diferentes proporções, formado exclusivamente por intervenção humana sobrejacente a qualquer horizonte pedogenético, ou saprolito de rocha, ou rocha não intemperizada [53].

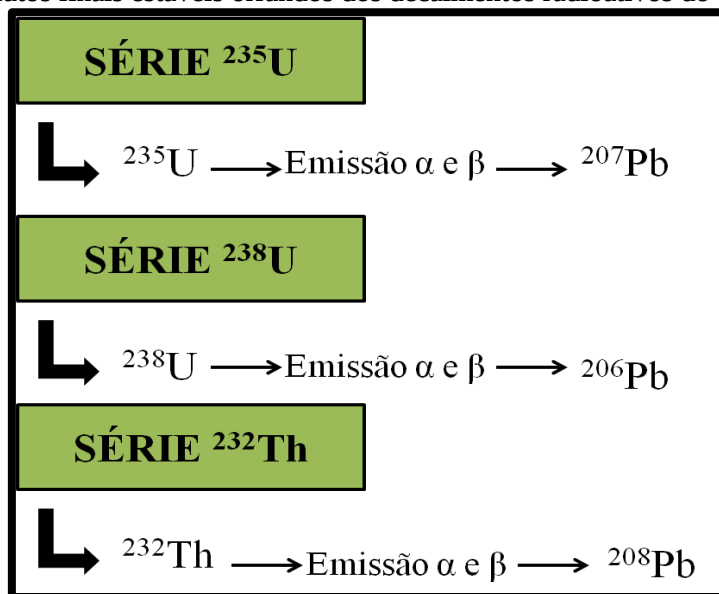
2.6 Chumbo: propriedades gerais, toxicidade e legislação

Com ocorrência natural em solos e rochas, a concentração de Pb pode variar entre 10 a 40 mg kg⁻¹ em amostras de solo e entre 0,1 a 10 mg kg⁻¹ em amostras de rochas calcárias. Os maiores valores de concentração encontrados em solos ocorrem devido ao comportamento específico desse metal em concentrar-se nos solos de regiões mais ácidas, influenciadas pelo intemperismo químico das rochas magmáticas e sedimentos argilosos [54] .

Embora a presença do chumbo na crosta terrestre seja inferior a 0,003%, sua abundância média é estimada em cerca de 15 mg kg⁻¹, justificando teores encontrados, muitas vezes, em solos naturais ausentes de manejo antropogênico [55].

No meio ambiente existem quatro isótopos naturais de Pb. Desse total, o ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb e ²⁰⁸Pb, são, respectivamente, os produtos finais estáveis oriundos dos decaimentos radioativos do ²³⁸U, ²³⁵U e ²³²Th, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Produtos finais estáveis oriundos dos decaimentos radioativos do ²³⁸U, ²³⁵U e ²³²Th.



Fonte: Adaptado de Ketterer, 2010 [56].

Por contemplarem as séries de radioatividade natural, ou seja, derivarem de decaimento radioativo, são denominados tipicamente de filhos de radônio. Portanto, os três isótopos radioativos de Pb apresentam, desde a gênese da Terra, suas concentrações médias relativas maximizadas com o passar do tempo, uma vez que estão associadas às abundâncias geológicas de distribuição espacial dos elementos urânio e tório, considerando suas constantes de decaimento (tempo de meia-vida) [56].

O quarto isótopo (²⁰⁴Pb), por não ser influenciado pelos decaimentos radioativos dos elementos U e Th, é classificado como não radiogênico e primordial, e sua concentração no meio ambiente é considerada constante, desde os primórdios da Terra.

A dinâmica da crosta terrestre, incluindo seus vários processos geológicos, sejam eles endógenos ou exógenos, podem agir continuamente sobre o material rochoso e então afetar a quantidade de U e Th existentes. Por isso, os isótopos de Pb derivados

destes elementos em conjunto com o isótopo de referência (^{204}Pb), podem ser utilizados como dados importantes para a compreensão da variabilidade isotópica em minerais.

Senso assim, a composição isotópica de Pb nos diferentes tipos de rocha e em solos é um importante registro do ambiente químico onde tal elemento originou-se e residiu, podendo ser utilizada em estudos sobre a evolução geológica de terrenos, determinação da idade de rochas e cronologia de processos geológicos além de estudos ambientais envolvendo desde toxicidade até geotecnologia [57].

O Pb é constituinte essencial na composição de diversos minerais, sobretudo, combinado com enxofre (S), na forma de sulfetos, onde a galena (PbS) é o principal representante de minério de chumbo (Figura 14). Nessa condição mineral o chumbo tem razões U/Pb e Th/Pb extremamente baixas ou que tendem a zero, de tal forma que nenhuma quantidade significativa de Pb radiogênico tenha sido gerada *in situ* desde sua formação [57].

Figura 14 - Ilustração do mineral galena (PbS).



Fonte: Adaptado de Bollhöfer, 2008 [58].

A evolução dos isótopos de Pb em rochas e depósitos minerais, ao longo do tempo, pode variar principalmente ao se tratar de chumbo radiogênico. Portanto, a evolução dos isótopos de Pb em uma rocha acontece via cristalização (principalmente em rocha ígnea) e depende de suas razões U/Pb e Th/Pb iniciais.

Partindo desse pré-suposto, quanto mais altas forem as razões U/Pb e Th/Pb, mais radiogênicas serão as composições isotópicas de Pb aferidas em rochas, depósitos minerais e solos. Como exemplos de minerais que contêm Pb radiogênico pode-se citar: zircão (ZrSiO_4), apatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$], epídoto [$\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$], monazita [$(\text{Ce}, \text{La})\text{PO}_4$], titanita (CaTiSiO_5), uraninita (UO_2), entre outros.

De acordo com Cheng & Hu, as razões isotópicas de Pb em amostras de rocha e solo variam principalmente e quase que exclusivamente, de acordo com as suas fontes

geológicas. A composição isotópica aferida nas amostras também pode indicar fontes múltiplas de Pb na área investigada, ou seja, a amostra pode ser enriquecida por fontes distintas, reconhecendo as possibilidades tanto naturais quanto antrópicas [59].

Portanto, pode-se adotar que a composição isotópica característica de diferentes tipos de minerais contendo Pb é causada pela provável combinação de processos que incluem: i) decaimento radioativo de U e Th em Pb; ii) a proporção relativa de U-Th-Pb no sistema; iii) a mistura de Pb provenientes de fontes distintas.

Nesse sentido, independente do processo ao qual a disponibilidade do metal está associada, é importante atentar-se aos possíveis riscos atrelados ao teor de chumbo no meio. Devido ao apelo de muitos cientistas do setor ambiental e também por ser um tema de discussão que envolve o meio ambiente e saúde pública, o Ministério do Meio Ambiente estabeleceu alguns limites para os níveis de contaminantes, tanto no solo quanto na água, por meio do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com as resoluções n.s 420/2009 e 357/2005 (BRASIL, 2005), respectivamente.

A Tabela 3 apresenta os valores orientados para chumbo em solos brasileiros, conforme Resolução n. 420 de 2009, do CONAMA [60].

Tabela 3 - Valores orientados para chumbo em solos brasileiros, conforme Resolução n. 420 de 2009, do CONAMA.

Metal	Solo (mg Kg ⁻¹)				
	Valor de Referência Qualidade (VRQ)	Valor de Prevenção (VP)	Valor de Intervenção		
			Agrícola	Residencial	Industrial
Chumbo	17	72	180	300	900

Fonte: Adaptado de Resolução n. 420 de 2009, do CONAMA [60]

Essa resolução estabeleceu três categorias de valores orientadores, diferenciados em: Valor de Referência de Qualidade (VRQ), que é a concentração, de determinada substância, que define a qualidade natural do solo; Valor de Prevenção (VP), referente à concentração limite de determinada substância no solo; e o Valor de Intervenção (VI) que quando ultrapassado confirma contaminação da área.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) [61] publicou, no ano de 2014, uma lista atualizada de valores orientados para solos e águas subterrâneas de diversas substâncias, incluindo o Pb, conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores orientados para chumbo em solos brasileiros, conforme CETESB, 2014.

Metal	Solo (mg Kg ⁻¹)				
	Valor de Referência de Qualidade (VRQ)	Valor de Prevenção (VP)	Valor de Intervenção		
			Agrícola	Residencial	Industrial
Chumbo	17	72	150	240	4400

Fonte: Adaptado de CETESB, 2014 [61].

Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), ao se tratar dos critérios de referência da qualidade do solo em Portugal, é recomendado a utilização da Norma de Ontário, estabelecida pelo Ministério do Ambiente de Ontário, Canadá. Os valores de referência pertinentes à concentração de Pb em solos são indicados na Tabela 5, e a legislação portuguesa adota tais normas canadenses mesmo que as especificidades geológicas sofram algum desvio [62].

Tabela 5 - Valores orientados para chumbo segundo Ministério de Ambiente de Ontário, 2011.

Metal	Solo (µg g ⁻¹)		
	Valor de Referência		
	Rural	Urbano	Industrial
Chumbo	45	120	120

Fonte: Adaptado de MEE, 2009 [62].

Esses valores estabelecidos em normas de agências ambientais, são baseados em pesquisas que levam em consideração as características regionais específicas. Além de serem ferramentas de fundamental importância para gerenciamento das causas ambientais, permitem identificar efeitos tanto naturais quanto antrópicos no meio ambiente em geral, não apenas em solos, mas em amostras de água e ar.

3. Justificativa e motivação

Incontestavelmente, temas relacionados ao meio ambiente são relevantes e apresentam crescente interesse à comunidade científica, uma vez que podem ser explorados nas mais diversas áreas da ciência.

Ao se tratar das inúmeras possibilidades de amostras ambientais, destacam-se amostras de ar (ou Material Particulado Atmosférico - MPA), água, solos, rochas, sedimentos, vegetação, alimentos, dentre outras que considerando suas complexidades podem ser analisadas em uma ampla variedade de componentes (analitos).

Por isso, uma das vertentes do Grupo de Pesquisa em Eletroanalítica e Sensores (GPES), onde parte desse trabalho foi desenvolvido, é norteadada na temática de química ambiental. Atualmente, tem-se gerado conhecimento aplicado em análises eletroquímicas de amostras ambientais variadas, fazendo com que haja *know-how* para desenvolvimento de trabalhos que proponham diagnósticos ambientais em regiões específicas.

A análise multivariada de metais (cobre, cádmio e chumbo) em MPA de diversas regiões do município de Presidente Prudente, via técnica eletroquímica de redissolução anódica, foi desenvolvida junto ao GPES e seus resultados já publicados, revelaram importantes conclusões quanto ao teor da concentração de Pb total [63].

Posteriormente, adotando da mesma técnica eletroquímica, pois dentre inúmeras vantagens apresenta excelente limite de detecção, realizou-se um diagnóstico em amostras de solos de áreas com falhamento geológico e áreas sem tal característica, relacionando os valores de concentração de Pb e exalação de gás Rn. Os resultados indicaram que em regiões caracterizadas por falhas geológicas apresentam, consideravelmente, valores maiores de concentração de Pb e exalação de Rn.

Tais resultados serviram como reforço para justificativa de que áreas de falhas geológicas apresentam teor elevado do metal Pb, por estarem relacionadas com a biodisponibilidade de Rn (ambos inseridos nas mesmas séries de decaimento radioativo) [64].

Na intenção de verificar essa mesma correlação em outras áreas com características similares (falhas geológicas), propôs-se uma parceria junto ao Laboratório de Radioatividade Natural (LRN), da Universidade de Coimbra. Desenvolveu-se medidas dosimétricas em regiões específicas de Portugal, já estudadas previamente por geólogos.

Portanto, a maior motivação desse trabalho é conseguir diagnosticar uma possível correlação entre concentração de chumbo e emissão de gás radônio em áreas de características geológicas semelhantes, nesse caso falhas geológicas. Isso possibilitará estabelecer um fator de referência para qualquer região do mundo que se ajuste às mesmas condições geológicas.

4. Objetivos

4.1 Objetivos gerais

Nesse contexto, os objetivos principais desse trabalho foram:

- Quantificar a exalação e emanação de gás radônio em áreas específicas de Portugal e Brasil (caracterizadas por falhas geológicas), buscando uma possível relação entre elas;
- Identificar e quantificar a concentração de chumbo total em amostras de solos e rochas, dessas mesmas regiões, via técnica eletroquímica;
- Correlacionar, estatisticamente, estes dados referentes ao quociente do teor de gás radônio e chumbo.

4.2 Objetivos específicos

- Especificação química dos isótopos, principalmente os de chumbo, componentes das séries de decaimento radioativo natural;
- Elaborar mapas indicativos das áreas de falhas geológicas com elevado potencial de emanação de radônio e concentração de chumbo.

5. Metodologia

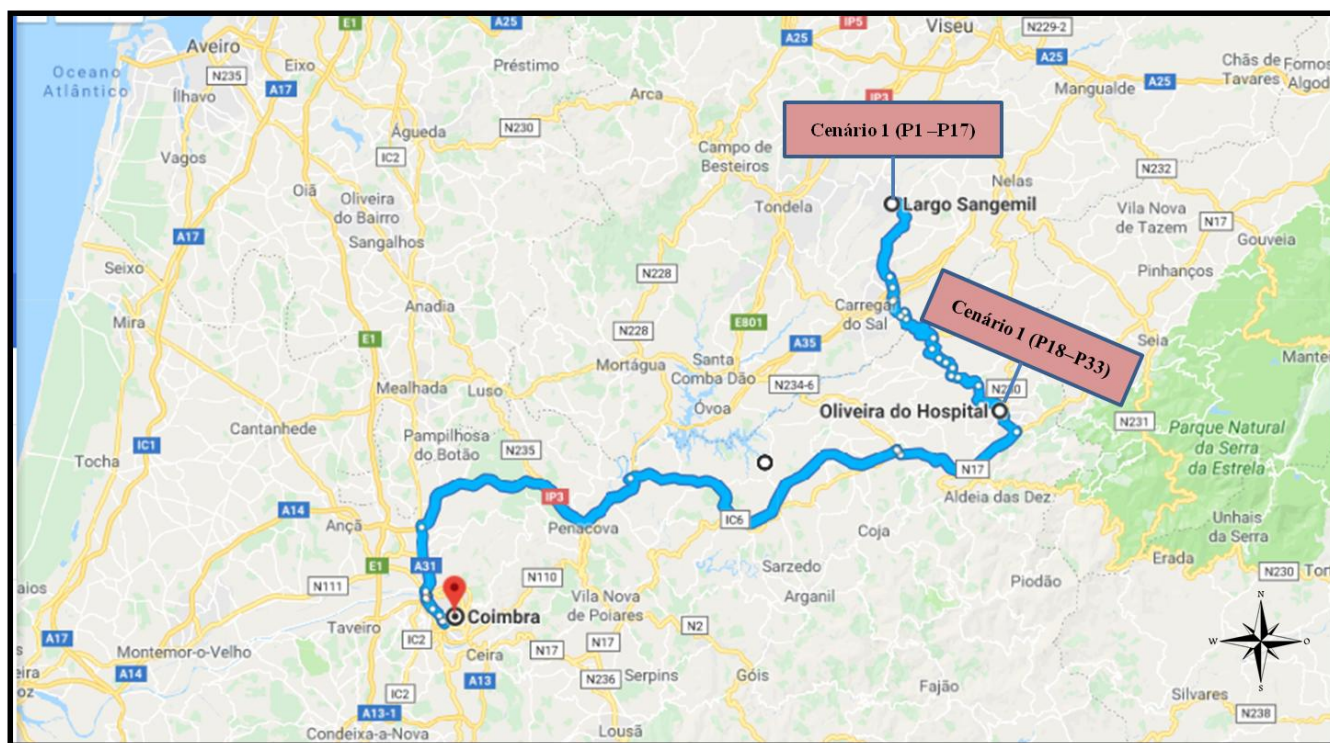
5.1 Considerações sobre as áreas de amostragem

A coleta das amostras foi dividida em dois cenários de amostragem: o primeiro (cenário 1) é referente às áreas específicas de Portugal, e o segundo (cenário 2) referente às áreas específicas no Brasil.

5.1.1 Cenário 1

Para esse cenário, foram definidas regiões previamente estudadas e caracterizadas por geólogos do Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade de Coimbra (LRN). Então determinou-se como áreas de estudos, as regiões de Sangemil e Oliveira do Hospital, conforme representação da Figura 15.

Figura 15 - Identificação das áreas de coleta no cenário 1: Sangemil e Oliveira do Hospital.



Sangemil é um pequeno povoado no vale do Rio Dão. Encontra-se no alinhamento que coincide com um importante acidente tectónico, que deu origem à falha geológica do Dão, de direcção NE – SW, e outras intersecções de falhas que provavelmente possibilitaram o encaixe do rio.

Localizada em uma região essencialmente montanhosa, predomina-se um vale apertado e profundo, de vertentes acentuadas e assimétricas. Segundo Pereira et.al [65], a região que aflora águas termais integra-se na Província Hidromineral que se correlaciona com a zona Geotectônica Galaico - Castelhana. Estas características denunciam a sua abertura ao longo de faixas de esmagamento da rocha granítica.

Quanto às águas termais, são proporcionadas devido aos canais de melhor circulação, denominados de estruturas condutivas hidrotermais, vinculados à inserção de falhas geológicas cruzadas, ou pela torção da superfície de falha capaz de criar maior volume de espaços ocupados pela água. Esses canais favorecem o fluxo térmico produzido na crosta, via decaimento radioativo.

Nesse contexto, optou-se em coletar dezessete amostras na região de Sangemil, que foram enumeradas sequencialmente, indicadas por pontos (P1 até P17).

A região de Oliveira do Hospital encontra-se no batólito granítico das Beiras, que abrange uma grande área do Maciço Ibérico Ocidental. Este batólito é composto principalmente de um grande corpo plutônico intrusivo com área aflorante, com composição granitóide variando de fino a grosso, além de muscovita³ e granitos contendo biotita⁴.

Nessa região, várias falhas geológicas de diferentes sistemas regionais foram mapeadas por meio da observação de campo e estudos sensoriais. Tais falhas apresentam afloramentos de granito grosso e granito biotítico porfirítico de tamanho médio a grosseiros.

Tal área também é rica em enclaves e em pontos selecionados com metassedimentos, provavelmente originados pelo processo de metamorfismo de contato induzido pelo granito. Os perfis de solo são rudimentares em grande extensão da área, caracterizados por solos fracamente desenvolvidos, onde apresentam um horizonte A fino e um horizonte B pouco desenvolvido.

Optou-se em coletar dezesseis amostras na região de Oliveira do Hospital, que foram enumeradas sequencialmente aos pontos coletados em Sangemil. Portanto, os pontos P18 até P33 são referentes a grande região de Oliveira do Hospital.

³ A moscovita/muscovita ou moscovite é um mineral do grupo dos filossilicatos, com fórmula molecular: $KAl_2O_{10}(OH, F)_2$. A moscovite caracteriza-se pela clivagem basáltica bem marcada e distingue-se da biotite em amostra de mão por ser incolor.

⁴ Biotita ou biotite é um mineral comum da classe dos silicatos, subclasse dos filossilicatos, grupo das micas e subgrupo ferromagnesianas, formando uma série com o mineral flogopita, que contém na sua composição potássio, magnésio, ferro e alumínio.

Subdividiu-se esses pontos em áreas diferenciadas (sub-regiões) , assumindo assim: P18 a P21 (Quinta/Oliveira do Hospital), P22 a P24 (Penalva/Oliveira do Hospital), P25 a P27 (Rotatória/Oliveira do Hospital), P28 a P33 (Parque Municipal/Oliveira do Hospital).

5.1.2 Cenário 2

Para esse cenário, foi definida uma região de provável intersecção de falhamentos geológicos previamente diagnosticada na zona rural do município de Presidente Prudente , conforme resultados já publicados por Moreira-Silva et.al. [64] e indicadas na Figura 16.

Figura 16 - Identificação do cenário2: município de Presidente Prudente/SP.



O município está localizado na Bacia Sedimentar do Paraná e no Planalto Ocidental Paulista, mais precisamente no Planalto Central Ocidental [66]. Tem como forma de relevo predominante as colinas amplas e baixas, que caracterizam-se em suavemente onduladas a onduladas.

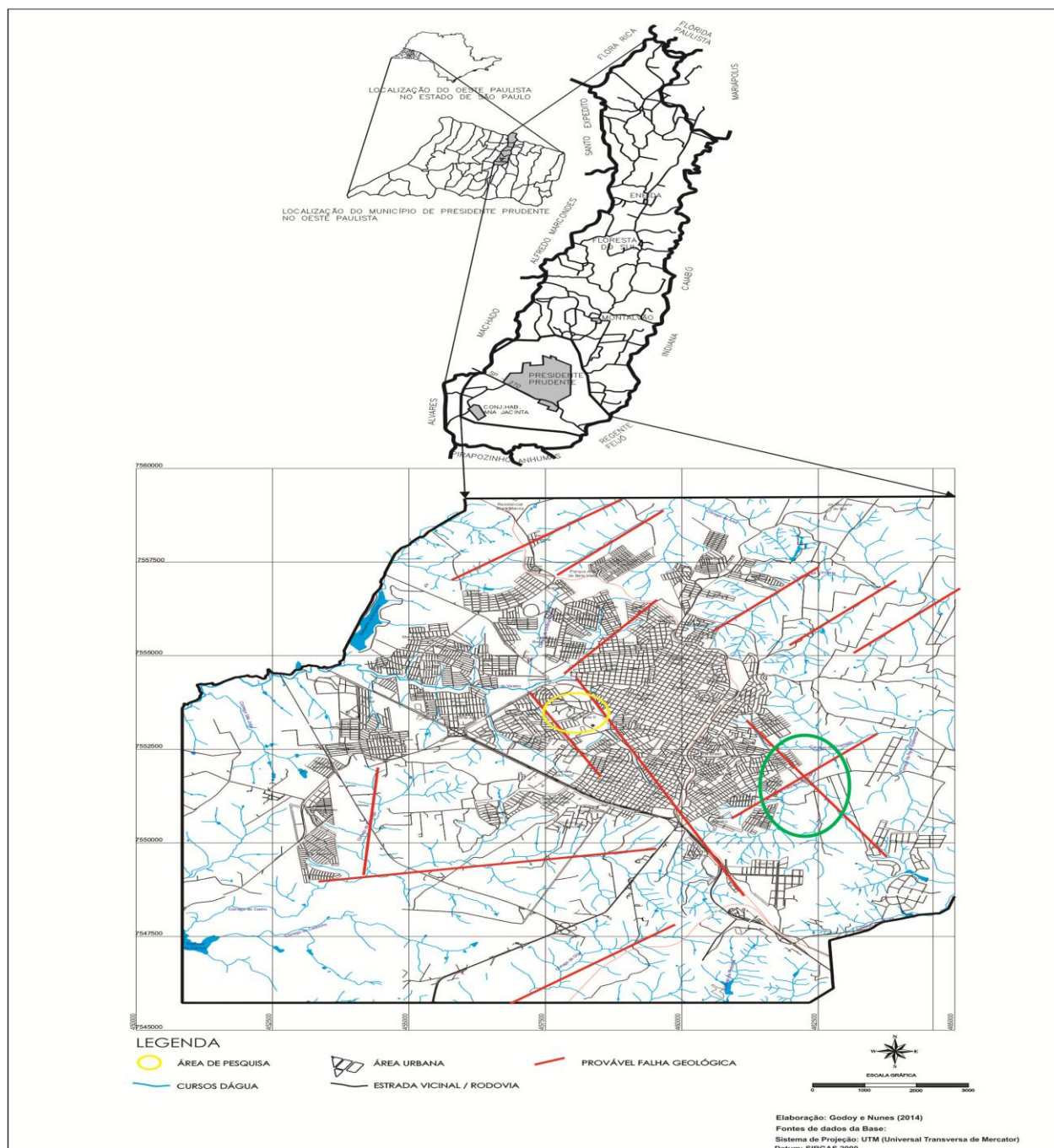
Segundo o Mapa Pedológico do estado de São Paulo, identificou-se aproximadamente oito tipos de solos na região do oeste paulista [67], onde os mais representativos em Presidente Prudente, resultado de processos pedogênicos ocorridos em rochas areníticas do Grupo Bauru, são os Argissolos Vermelhos e os Latossolos Vermelhos [68].

A região de Presidente Prudente/SP apresenta fortes indícios da localização e direção de falhas geológicas soterrada a aproximadamente 200 m de profundidade sendo uma característica marcante de regiões onde há fontes geotérmicas [37].

É muito provável que essas falhas estejam vinculadas com outras, que se mostram na superfície através de córregos existentes no município, que por sua vez podem estar ligadas a falhas mais importantes que atravessam praticamente todo o interior do estado de São Paulo [38].

Conforme contribuições de Godoy e Nunes, e atentando-se a estudos geológico, análise estrutural e cartografia de solos da região de Presidente Prudente [69, 70], foi traçado um esboço representativo dos prováveis lineamentos neotectônicos na área de estudos onde escolheu-se para o desenvolvimento dessa pesquisa a região de intersecção de falhas geológicas, representada pelo círculo verde conforme ilustração da Figura 17.

Figura 17 - Localização da área de estudo no município de Presidente Prudente-SP, com as possíveis falhas geológicas.



Fonte: Adaptado de Moreira-Silva, 2017 [64].

É importante ressaltar que foram estudados 15 pontos (B1 a B15) no cenário 2, e avaliados apenas pelos métodos utilizando CR-39 (para aferição do teor de ^{222}Rn), análise eletroquímica (quantificação da concentração de chumbo total) e análise granulométrica, uma vez que são os métodos disponíveis e acessíveis no Brasil, que

estão devidamente explanados nos itens 5.6, 5.7, 5.8 e também em Moreira-Silva et.al [64].

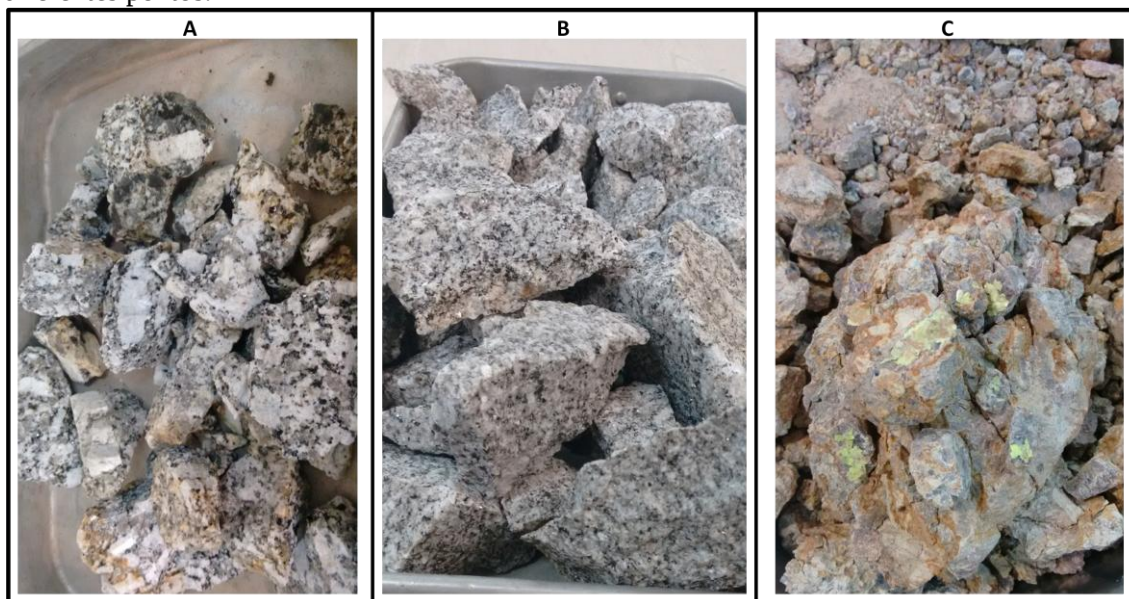
5.2 Coleta e preparação das amostras de rochas e solos

As coletas das amostras, no cenário 1, foram possíveis devido ao desenvolvimento do mapeamento geológico das áreas referentes a este trabalho pelos geólogos do Laboratório de Radioactividade Natural da Universidade de Coimbra (LRN). Portanto, seguindo a interpretação da planta topográfica de cada área foi possível localizar e explorar os afloramentos rochosos de forma pertinente.

Optou-se em coletar amostras dos tipos pontuais, ou seja, lascas ou pequenos blocos de rochas utilizando um martelo como instrumento de fragmentação. Devido a complexidade das áreas, coletou-se entre 3 a 4 quilos de amostras para garantir representatividade. As amostras foram devidamente armazenadas em sacos plásticos e identificadas, então levadas ao laboratório.

A partir das amostras de rocha, conforme ilustração da Figura 18, preparou-se o material para posterior análise geoquímica. Os principais processos a serem considerados nessa etapa de preparação das amostras foram: secagem, britagem, moagem, peneiração, quarteamento e armazenamento.

Figura 18 - Imagem representativa das amostras de rochas coletadas em trabalho de campo, em diferentes pontos.

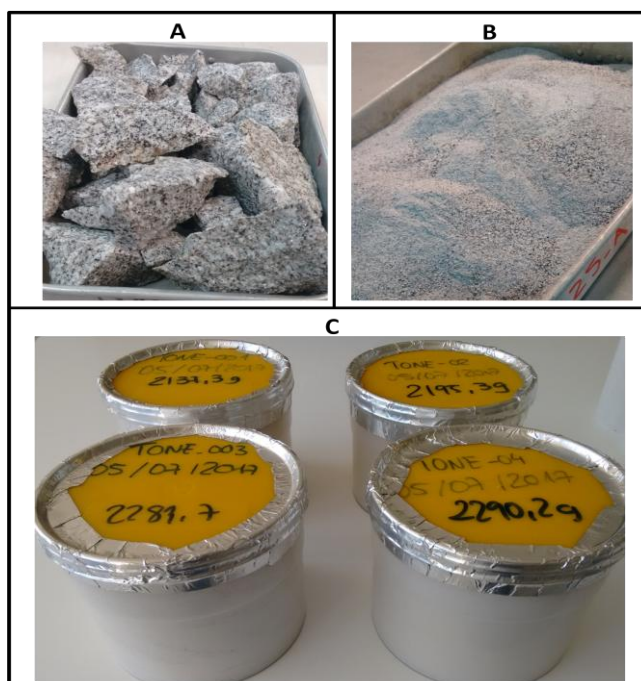


A secagem é fundamental, e foi realizada em estufa com temperatura ajustada em 105°C durante 24 horas, com a finalidade de eliminar a umidade, uma vez que amostras úmidas não podem ser peneiradas de maneira eficaz.

A britagem e moagem são processos de redução do tamanho das amostras de rocha. Foram realizados em moinho do tipo mandíbula, que já forneceu uma boa granulometria e finalizados em moinho de anéis capaz de proporcionar granulometrias com superfícies específicas maiores.

A peneiração foi realizada em peneira de abertura inferior a 1,5mm e posteriormente realizou-se a mistura e quarteamento, que gerou porções homogêneas e representativas das amostras. Foram então acondicionados em recipientes plásticos tipo béquer Marinelli de 2 litros, e pesados para aferir a massa final, de acordo com a representação da Figura 19.

Figura 19 - Imagem representativa dos processo de secagem (A), de moagem em (B) e armazenamento em béquer Marinelli (C).



O método de amostragem de solos para o cenário 2, foi baseado nos procedimentos adotados pela CETESB [71] e realizado na região da suposta falha geológica, na zona rural do município de Presidente Prudente.

A profundidade de interesse para a amostragem do solo varia de acordo com a finalidade dos estudos, onde nesse contexto foram coletadas amostras em três

diferentes profundidades (15, 30 e 60 cm), com a intenção de verificar a variação na concentração de Pb em cada perfil de solo. Para garantir a integridade química e mineralógica das amostras coletadas, adotaram-se algumas medidas:

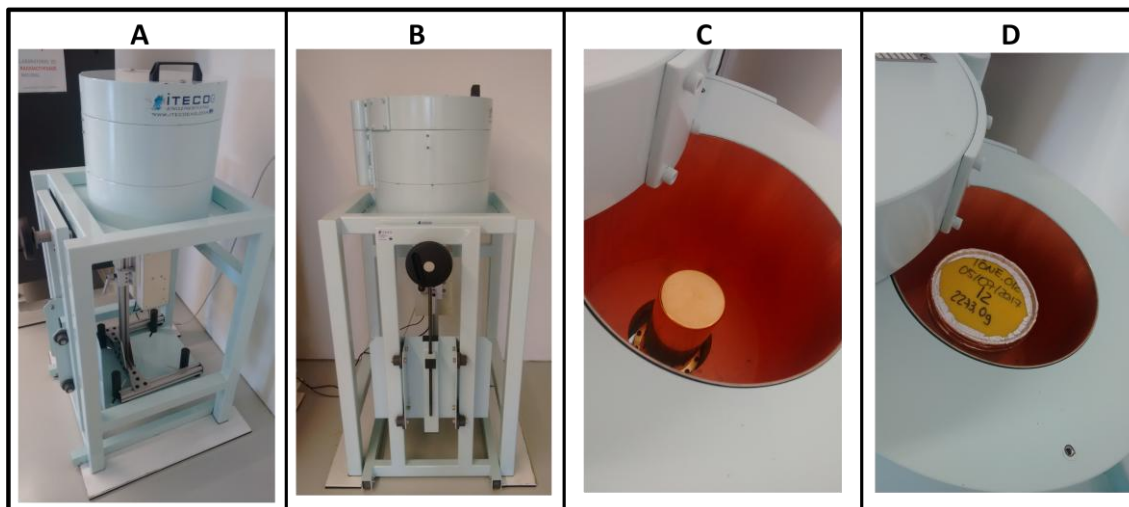
- O executor da coleta estava provido de luvas;
- Utilizou-se um trado manual do tipo caneco, perfurando o solo em três profundidades distintas (15, 30 e 60 cm);
- As amostras foram acondicionadas imediatamente após a sua retirada do perfil do solo, e tomou-se o cuidado em coletar apenas o solo contido na região central do trado. Foi realizado o manuseio da amostra com cautela para não arrastar o solo fixado nas paredes do trado, evitando qualquer contaminação;
- As amostras foram armazenadas em recipientes de tampa hermética e esterilizados, que foram devidamente identificados e levados ao laboratório.

5.3 Espectrometria com detector de germânio de alta resolução

O sistema espectrométrico é constituído por um detector de germânio de alta pureza (HPGe) coaxial tipo P, modelo LDM-1, fabricado pela Ortec. Esse detector, possui uma eficiência relativa de 43,3% reportadas para a linha de 1332 keV do ^{60}Co , segundo as especificações do fabricante.

O detector encontra-se dentro de uma câmara de baixo fundo cilíndrica, também denominada de Castelo de Chumbo Iteco, conforme ilustração da Figura 20. A câmara é composta por camadas de diferentes materiais, sendo a mais externa de aço. A camada intermediária, e mais espessa, é feita de chumbo e as duas camadas mais internas são constituídas por cobre e cádmio. As últimas camadas têm a finalidade de atenuar os raios-X do chumbo, cuja energia fica na faixa entre os 70-80 keV.

Figura 20 - Ilustração do sistema espectrométrico com detector de germânio de alta pureza: em (A) sistema completo, (B) câmara de baixo fundo cilíndrica (Castelo de Chumbo Iteco), em (C) o interior da câmara e a amostra inserida no sistema em (D).



O sinal de saída do detector é armazenado e processado por um sistema de aquisição de dados ligado ao computador, onde todos os parâmetros eletrônicos podem ser ajustados utilizando o software Gamma Vision 8.0. Todos os espectros foram obtidos com os seguintes parâmetros iniciais: 8192 canais, um tempo de conformação do pulso (shaping time) de 4 μ s.

Nesse sistema de espectrometria gama os espectros são obtidos sob a forma de histogramas de altura de pulsos por canais. Há uma proporcionalidade entre a energia depositada pelo fóton (E) no volume ativo do detector e o canal (C) correspondente no espectro. Por isso faz-se necessária a calibração de energia do detector, que consiste em atribuir uma energia para cada canal do histograma, o que é importante para a identificação dos fotopicos presentes no espectro.

Realizou-se a calibração via fonte radioativa com energias definidas, cujos fotopicos são facilmente distinguíveis no espectro. Isso possibilitou determinar coerentemente os centroides para cada um dos picos. A fonte de calibração utilizado tem origem do *Czech Metrology Institute*, com uma especificação de atividade total de 82,92 kBq. O tempo de medição para obtenção dos espectros e calibração foi de 24 horas.

Portanto, foi possível obter informações quanto a atividade de vários elementos constituintes das séries de decaimento radioativo natural, os quais destacam-se: ^{235}U , ^{228}Ac , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{212}Bi , ^{214}Bi , ^{234}Pa , ^{208}Tl além de ^{40}K .

5.4 Avaliação da emissão de radônio em recipientes de metal

Utilizando-se das mesmas amostras em recipientes plásticos tipo béquer Marinelli de 2 litros, citadas anteriormente, procedeu-se as medidas em laboratório da emissão de radônio e rádio.

Os béqueres Marinelli contendo as amostras foram armazenados em recipientes metálicos durante um período de três semanas. Os recipientes foram devidamente tampados e selados com um anel metálico para evitar a saída de ar. As tampas são equipadas com duas válvulas, uma para entrada de gás e outra para saída.

Com auxílio de um medidor AlphaGuard (Professional Radon Monitor) e uma bomba de gás (Gas pump), conforme ilustração da Figura 21, foram realizadas as medidas por um período de 30 minutos. Fez-se a descontaminação do sistema por 30 minutos, após cada medição.

Figura 21 - Imagem representativa do medidor AlphaGuard e bomba de gás acoplados ao recipiente metálico onde está inserida a amostra.



Partindo desses resultados, calculou-se o coeficiente de emissão dessas rochas graníticas. Uma vez que a relação entre os isótopos ^{222}Rn e ^{226}Ra (expresso pelo coeficiente de emissão) é uma ferramenta essencial na avaliação do potencial de radônio geogênico.

O coeficiente de emissão (E) foi calculado a partir da equação 3:

$$E = \frac{C_{eq} \cdot V}{A_{Ra} \cdot W} \quad (3)$$

onde C_{eq} é a concentração de ^{222}Rn no contentor selado (após o equilíbrio isotópico), V é o volume livre do contentor, W é o peso da amostra e A_{Ra} é a atividade de massa do ^{226}Ra .

5.5 Perfuração das rochas e determinação da atividade de ^{222}Rn e ^{238}U *in situ*

Com base nas mesmas áreas de amostragem já mencionadas, procedeu-se a determinação da atividade de ^{222}Rn e ^{238}U diretamente nas rochas. Esse estudo foi aplicado apenas na região de Sangemil devido às dificuldades ligadas ao processo metodológico, que inviabilizou as análises em Oliveira do Hospital.

Para garantir a representatividade da região, optou-se pela amostragem composta. Realizaram-se 26 furos, via técnica de perfuração à rotação com o auxílio de uma broca de 22 mm de diâmetro com alcance de 80 cm de profundidade, conforme ilustração da Figura 22A.

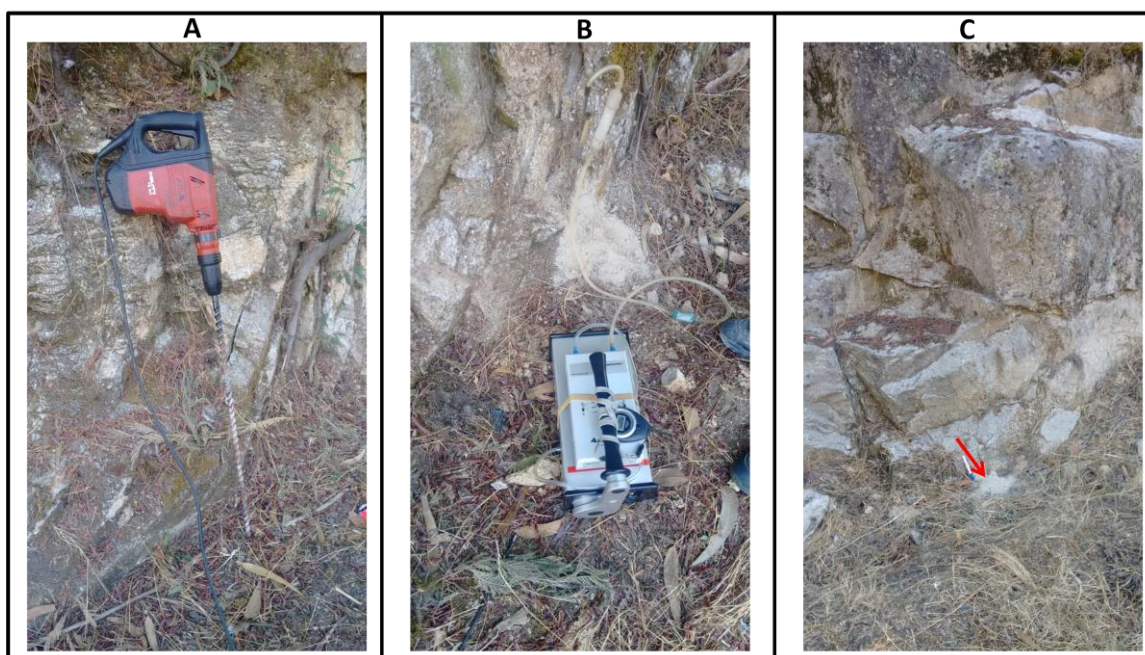
A relação da quantidade de furos que representa cada ponto é: P1(2 furos), P2 (2furos), P3 (2furos), P4 (2furos), P5 (2furos), P6 (2furos), P7 (2furos), P8 (2furos), P9 (2furos), P10 (2furos), P11 (2furos), P12 (2furos), P13 (2furos), P14 (2furos), P15 (2furos) e P16 (2furos),

Imediatamente após a execução de cada furo introduziu-se uma sonda metálica e isolou-se a parte superior do furo (Figura 22B), de forma a impedir a entrada de ar atmosférico e consequente contaminação do ar já infiltrado no solo [65].

A sucção do ar contido no solo foi realizada com o auxílio de uma bomba (AlphaPump, Saphymo), a uma pressão constante de 1 L/min. Tal pressão permite recolher, sem muitas variações, o mesmo volume de ar para cada furo, tornando a medição da atividade de ^{222}Rn e ^{238}U nos solos independente da permeabilidade dos mesmos.

Em cada sondagem a sucção de ar durou 1 minuto e a atividade de ^{222}Rn foi determinada com auxílio de um AlphaGuard (PQ2000PRO, Saphymo), equipado com uma câmara de ionização com volume de 0,62 L e capacidade de medição no intervalo de 2 a 2 MBq/m³. As atividade de ^{222}Rn e ^{238}U consideradas para análise estatística corresponde ao valor médio das contagens efetuadas durante um intervalo de no mínimo 10 minutos após a coleta de ar.

Figura 22 - Ilustração dos procedimentos de perfuração e determinação da atividade de ^{222}Rn em rochas: (A) furadeira com broca de 80 cm; em (B) sonda metálica acoplada à bomba AlphaPump e medidor AlphaGuard e (C) marcação do furo após retirada da sonda.

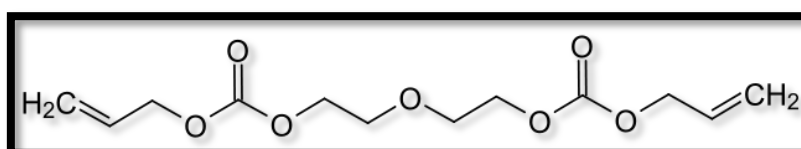


5.6 Detector de Traços Nucleares de Estado Sólido - CR-39

A utilização dos Detectores de Traços Nucleares de Estado Sólido, do inglês *Solid State Nuclear Track Detector* (SSNTD), iniciou-se na década de sessenta [72] e vem propagando-se, onde atualmente são utilizados em inúmeras áreas nas quais ressaltam-se a radiografia, dosimetria e principalmente para a detecção de radônio e radiação cósmica.

Dentre os variados Detectores de Traços Nucleares de Estado Sólido destaca-se o de origem orgânica constituído a base de policarbonatos, denominado CR-39 (allyl diglycol-carbonate - $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$) que é o detector plástico mais eficiente, pelo menos dentre os disponibilizados comercialmente [73, 74]. Sua fórmula estrutural é representada na Figura 23.

Figura 23 - Fórmula estrutural do monômero do detector de traço nuclear de estado sólido CR-39.



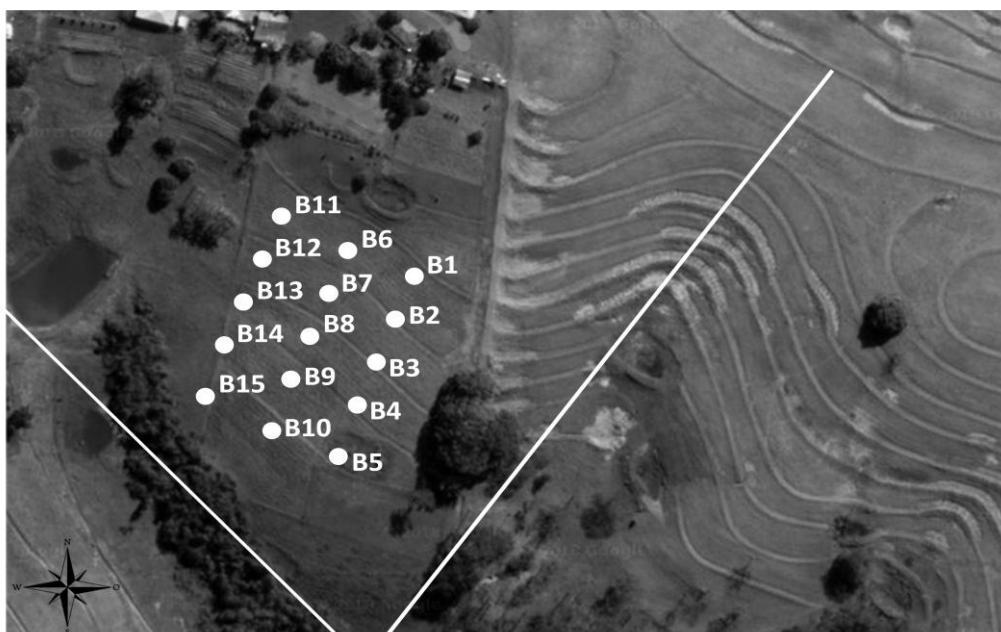
Uma das grandes vantagens do CR-39, além de sua eficiência e sensibilidade às partículas α com energia na ordem de Kev até Mev, é o fato de ser totalmente amorfo, promovendo a habilidade de registrar traços regulares de alguns tipos de radiações mediante danos permanentes causados em sua estrutura [75]. Por ser um detector de plástico transparente faz com que exista um contraste ideal entre os traços e o próprio corpo do plástico após um ataque químico facilitando a observação ao microscópio óptico.

5.6.1 Exposição dos detectores CR-39 no solo

Os detectores CR-39 foram expostos nos mesmos 15 pontos de coleta de amostras de solo na zona rural, com fortes indicativos da presença de falhas geológicas, no município de Presidente Prudente.

Antecipadamente ao trabalho de campo, planejou-se a implantação em uma malha de três fileiras com cinco detectores, com espaçamento de aproximadamente 15 metros entre cada um, conforme ilustração da Figura 24.

Figura 24 - Malha de coletas indicando os 15 pontos no cenário 2.



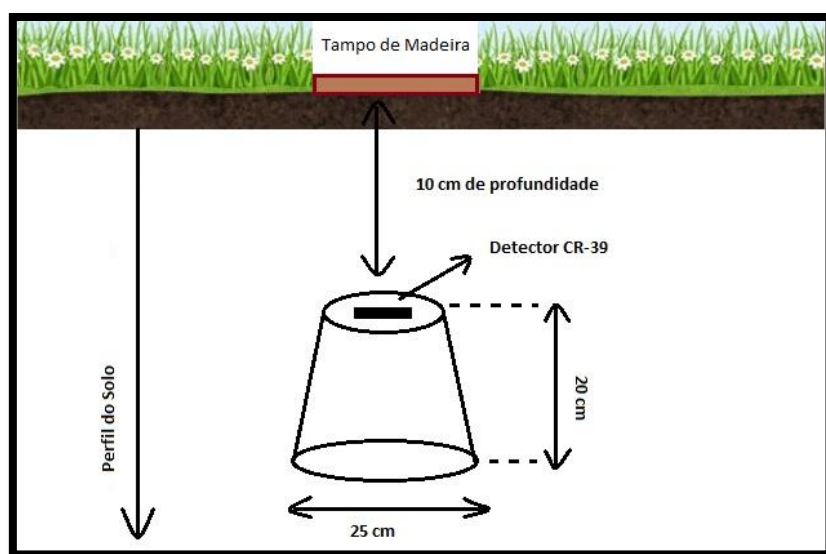
Fixaram-se os detectores, centralizados, na base interior de frascos de plástico utilizando fita adesiva dupla face e foram devidamente identificados.

Os frascos contendo o CR-39 foram enterrados nos pontos previamente

planejados, com aproximadamente 30 cm de profundidade. Após estarem completamente enterrados, protegeu-se os frascos com um tampo de madeira de mesma dimensão conforme esquema representado na Figura 25. Os locais de exposição foram devidamente sinalizados, e a exposição deu-se por um tempo de 90 dias.

Para garantir a coesão dos resultados, utilizou-se um detector da mesma série de produção industrial pra servir de *background* para as análises.

Figura 25 - Representação da implantação do CR-39.



Fonte: Autoria própria.

5.6.2 Ataque químico ao CR-39 e contagem dos traços

Uma partícula carregada (fragmentos de fissão, partículas α , prótons, etc.) quando incide sobre um SSNTD provoca um desarranjo na sua estrutura molecular, devido a ionizações e excitações aos átomos e moléculas no interior do detector que é denominado de traço latente.

Esses traços constituem zonas quimicamente mais ativas de modo que sob ação de soluções químicas adequadas podem ser aumentadas radialmente da ordem de Å (angstroms) até que sejam visíveis em microscópio óptico comum, ordem de micrômetros; onde o tamanho depende da energia da partícula e o ângulo incidente.

Nesse sentido, em parceria com o Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade de Coimbra, realizou-se o ataque químico padrão do CR-39 em solução concentrada de NaOH (6,25 mol/L) sob aquecimento em um banho ultratérmico de

70 °C, em um tempo de 400 minutos; segundo De Paulo [73]. Posteriormente, o CR-39 foi neutralizado em uma solução saturada de NaHCO_3 e lavado em abundância com H_2O .

A observação e a contagem dos traços foram realizados através do equipamento da marca RADOSYS, modelo Radometer 2000 RSV10, conforme Figura 26.

Figura 26 - Equipamento da marca RADOSYS, modelo Radometer 2000 RSV10.



5.7 Análise Granulométrica das amostras de solos

A distribuição granulométrica dos materiais granulares, areias e pedregulhos, pode ser obtida através de peneiramento de uma amostra seca em estufa. O peneiramento das amostras *in natura* ou previamente moídas é um dos métodos mais usados para a avaliação e classificação da distribuição do tamanho das partículas.

Para siltes e argilas, utiliza-se a sedimentação dos sólidos em meio líquido. Para solos, que tem partículas tanto na fração grossa (areia e pedregulho) quanto na fração fina (silte e argila) se torna necessária a análise granulométrica conjunta, baseando-se em técnicas de subpeneiramento que utilizam da lei de Stokes, fundamentada na velocidade terminal de sedimentação das partículas em meio aquoso.

Quando uma partícula é imersa em um meio fluido qualquer, fica basicamente sujeita a uma força resistiva, cuja magnitude depende do regime fluidodinâmico vigente, além dos aspectos morfológicos dessa partícula. Ao ser alcançado o equilíbrio entre a força gravitacional e a força de resistência do fluido, a partícula atinge sua velocidade terminal de sedimentação e, portanto, cai a uma taxa constante [76].

Para o desenvolvimento desse etapa do trabalho, a análise textural seguiu as normas do Manual de Métodos de Análises de Solos, utilizando o método da pipeta [77].

Iniciou-se com o destorroamento do solo (Figura 27 (a)), onde as amostras foram secas ao ar por um período de uma semana e em seguida realizou-se a moagem em almofariz com auxílio de um pistilo, até obtenção de amostras finamente moídas e homogêneas. Foram pesados 10 g desse solo seco e moído em um erlenmeyer, e adicionou-se 20 mL de água destilada e 10 mL de uma solução de hidróxido de sódio 1 mol L^{-1} . Os erlenmeyers foram agitados em mesa agitadora por 6 horas para garantir a desagregação dos diferentes grãos que compõem o solo.

Após agitação, as soluções foram peneiradas em peneira com abertura de 0,053mm, com auxílio de um funil, em provetas de 1000 mL. Foram lavadas com água destilada até completar o volume de 1000 mL, onde as frações de silte e argila ficaram depositadas. Nessa primeira etapa de peneiração, todas as frações de areia ficaram retidas na peneira.

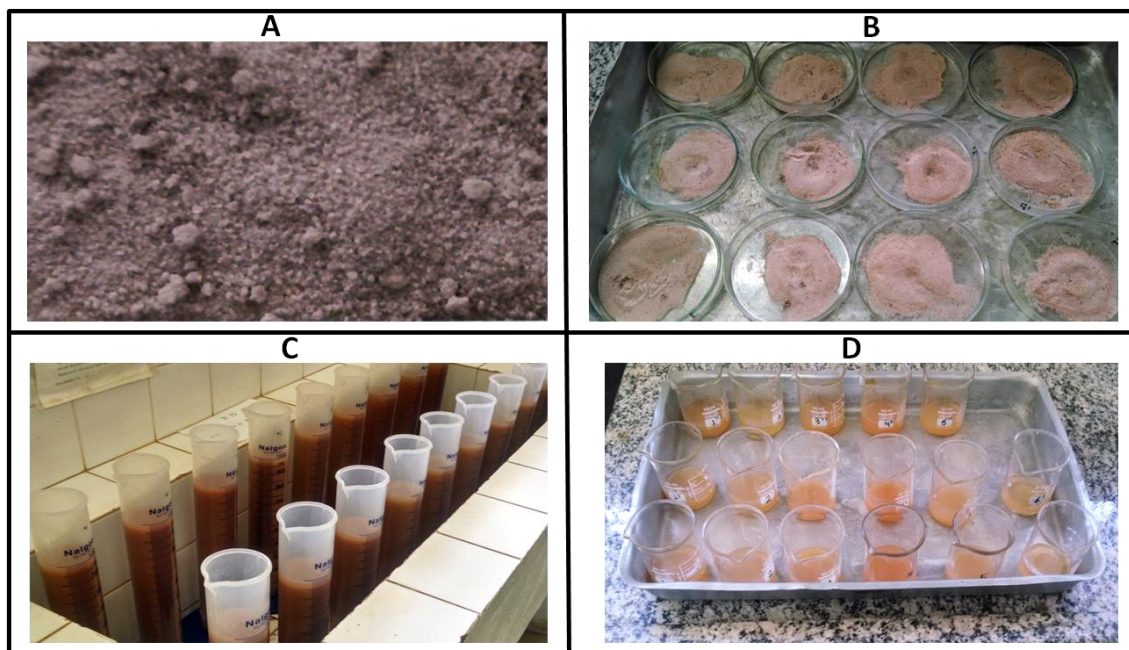
Transferiu-se a areia para placas de Petri, previamente secas em estufa e pesadas. A areia foi mantida na estufa por 24 horas a 105°C , e quando transcorrido este tempo foi resfriada em dissecador e por fim as placas de Petri contendo as areias foram devidamente pesadas e anotados seus valores (Figura 27 (b)).

As provetas contendo argila e silte foram condicionadas em um tanque com água, para manter uma uniformidade térmica (Figura 27 (c)). Com um termômetro foram aferidas as temperatura da solução e anotadas. Agitou-se com um bastão de vidro por 30 segundos deixando um intervalo de 2 minutos para a agitação da amostra seguinte

. O início da agitação foi determinado como o tempo inicial (tempo zero), e quando finalizado o tempo de sedimentação iniciou-se a pipetagem de 5mL da solução com intervalo de tempo de 2 minutos entre uma amostra e outra.

Transferiu-se as alíquotas para béqueres previamente pesados, e foram secos em estufa por 24 horas a 105°C . Transcorrido este tempo e resfriados em dissecador, pesou-se as massas dos béqueres com a argila (Figura 27 (d)). Os valores das massas foram devidamente anotados para obtenção dos resultados das frações de areia, silte e argila de cada amostra de solo. As análises foram realizadas em triplicata.

Figura 27- Ilustração das etapas da análise granulométrica conjunta.

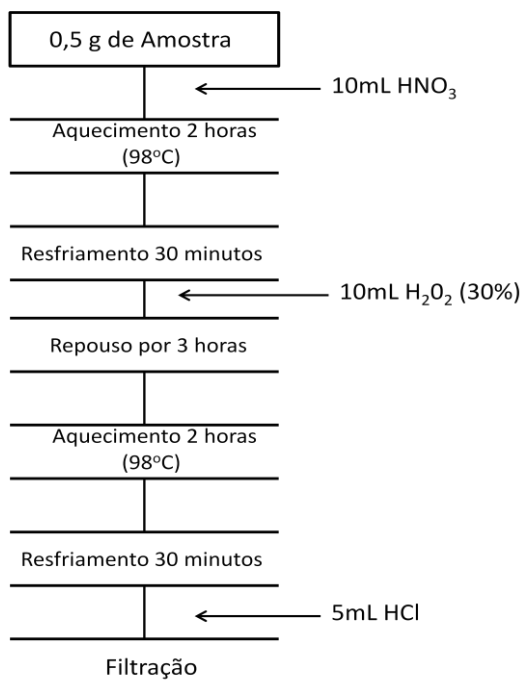


5.8 Pré-tratamento das amostras para análise eletroquímica

As amostras de rochas, já devidamente processadas como descrito no item 5.2, foram secas em estufa a temperatura aproximada de 100 °C, durante 24 horas. Posteriormente maceradas em cadinho de porcelana e quarteadas afim de obtenção de amostras representativas.

Individualmente, todas as amostras foram submetidas ao procedimento de digestão ácida baseado no método USEPA 3050 [78], conforme fluxograma da Figura 28.

Figura 28 - Fluxograma referente à metodologia de abertura das amostras.



Pesou-se 0,5 g da amostra e transferiu-se para um tudo de digestão onde foi adicionado 10 mL de HNO_3 65% (v/v), e mantido sob aquecimento em bloco digestor (98°C) por 120 minutos. Após este período, resfriou-se a solução por 30 minutos e então adicionou-se 10mL de H_2O_2 30% (v/v).

Manteve-se em repouso por um período de 180 minutos até cessar a efervescência. Em sequência, aqueceu-se novamente no bloco digestor por 2 horas a 98°C . Por fim, a amostra foi resfriada e adicionou-se 5mL de HCl 38% (v/v). A solução foi filtrada e armazenada em recipiente plástico estéril. Realizou-se tal procedimento para todas as amostras.

5.9 Análise via voltametria de redissolução anódica

A técnica de voltametria de redissolução anódica foi realizada em um processador voltamétrico modelo 797 VA (Metrohm). A célula eletroquímica para as medidas voltamétricas é constituída por um eletrodo de mercúrio no modo gota pendente (*HMDE, Hanging Mercury Drop Electrode*) como eletrodo de trabalho, um eletrodo de Ag/AgCl (KCl 3 M) como referência e um eletrodo auxiliar de platina (Pt), de acordo com a ilustração da Figura 29.

Figura 29 - Processador voltamétrico modelo 797 VA (Metrohm) e célula eletroquímica constituída por três eletrodos.



A partir dos estudos referentes às melhores condições operacionais, conforme indicação na Tabela 6, as amostras de solo foram analisadas quanto ao seu teor de chumbo via análise voltamétrica por redissolução anódica com pulso diferencial utilizando eletrodo de mercúrio no modo gota pendente.

Tabela 6 - Parâmetros metodológicos para aplicação da técnica voltamétrica.

Parâmetros Experimentais	Valores	Parâmetros Experimentais	Valores
Tempo de Purga com N₂	30s	Potencial Inicial de Varredura	-0.6 V
Tamanho da gota	4	Tempo de Deposição	30s
Velocidade de Varredura	5 mV s ⁻¹	Tempo de Equilíbrio	10s
Potencial de Deposição	-1.2 V	Potencial Final de Varredura	-0.2 V

Uma reação eletroquímica entre o analito e o eletrodo de trabalho ocorre antes da varredura de potencial e, justamente devido a essa reação, o analito foi pré-concentrado no eletrodo de trabalho (etapa de pré-concentração). Consequentemente, um aumento da magnitude da corrente medida é obtido, com diminuição significativa dos limites de detecção alcançados para a espécie química em interesse .

Inicialmente adicionou-se à célula eletroquímica 20 mL de NaNO₃, sendo o eletrólito suporte utilizado para as determinações de Pb. Em seguida, desaerou-se a solução com nitrogênio por um período de 5 minutos.

Com o potencial do eletrodo ajustado a um valor suficientemente negativo para reduzir os íons a sua forma metálica, a etapa de pré-concentração foi realizada sob agitação constante, em -1,2 V (vs. Ag/AgCl) para concentrar os metais na superfície do eletrodo de mercúrio (formação do amálgama) a partir de um volume de 2 mL de amostra, por 30 segundos e em seguida deixou-se a solução em repouso por alguns segundos para o sistema entrar em equilíbrio.

Após a etapa de pré-concentração, realizou-se uma varredura de potencial, em um intervalo de -0,6 a -0,2 V, e velocidade de varredura de 5 mV s⁻¹ no qual o analito (Pb) foi redissolvido para a solução, devido à sua reoxidação [79]. Com isso, foi possível obter o valor da corrente de pico correspondente ao Pb. Para obtenção das curvas analíticas por adição múltipla de padrão, repetiu-se tal procedimento com sucessivas adições 1,0 µL de solução padrão de Pb (II) 1,00 x 10⁻³ mol L⁻¹ [63, 64].

5.10 Análise Estatística

O tratamento estatístico dos dados foram realizados por meio do programa STATISTIC utilizando inicialmente a correlação de Pearson com seus respectivos graus de significância, que mede o grau de dependência linear entre as variáveis.

6. Resultados e discussão

6.1 Determinação das concentrações de U e Th.

A Tabela 7 indica os valores das atividades específicas de U^{235} , U^{238} e Th^{232} e seus respectivos desvios padrões, nos 33 pontos de coleta, que estão devidamente diferenciados por regiões. Os pontos P1 a P17 (Sangemil), P18 a P21 (Oliveira do Hospital/Quinta), P22 a P24 (Oliveira do Hospital-Penalva), P25 a P27 (Oliveira do Hospital/Rotatória), P28 a P33(Pq. Municipal).

Tabela 7 - Valores das concentrações das atividades dos elementos U^{235} , U^{238} e Th^{232} .

Pontos	Radionuclídeos (Bq Kg ⁻¹)		
	U^{235}	U^{238}	Th^{232}
P1	12,80 ± 0,2	218,3 ± 1,7	100,7 ± 0,8
P2	10,90 ± 0,1	182,1 ± 0,8	95,70 ± 0,5
P3	10,60 ± 0,1	188,5 ± 0,9	87,00 ± 0,5
P4	10,40 ± 0,1	177,0 ± 0,5	94,20 ± 0,2
P5	16,10 ± 0,1	266,4 ± 1,9	93,30 ± 0,3
P6	10,50 ± 0,2	150,5 ± 0,8	88,90 ± 0,5
P7	9,300 ± 0,1	138,9 ± 0,8	86,00 ± 0,3
P8	11,00 ± 0,2	204,8 ± 1,2	99,10 ± 0,5
P9	6,800 ± 0,1	107,4 ± 0,9	104,7 ± 1,1
P10	13,90 ± 0,2	230,7 ± 1,5	119,0 ± 1,5
P11	11,00 ± 0,2	177,3 ± 0,8	82,70 ± 0,5
P12	14,70 ± 0,4	214,4 ± 1,1	92,90 ± 0,5
P13	7,700 ± 0,1	147,8 ± 0,8	94,00 ± 0,5
P14	16,40 ± 0,3	266,9 ± 1,7	83,60 ± 0,5
P15	10,20 ± 0,2	197,0 ± 0,8	94,60 ± 0,7
P16	35,70 ± 0,5	638,6 ± 2,6	78,80 ± 0,5
P17	11,00 ± 0,1	180,6 ± 0,8	109,0 ± 1,1
P18	79,20 ± 0,7	1289,2 ± 3,6	74,20 ± 0,3
P19	25,60 ± 0,2	422,3 ± 2,1	60,10 ± 0,3
P20	20,90 ± 0,2	283,4 ± 1,8	129,5 ± 0,5
P21	11,90 ± 0,1	203,9 ± 1,5	125,1 ± 0,5
P22	25,30 ± 0,2	455,2 ± 2,1	110,2 ± 0,7
P23	11,70 ± 0,2	217,2 ± 1,6	123,1 ± 0,9
P24	19,70 ± 0,3	323,0 ± 1,6	107,3 ± 0,9
P25	14,60 ± 0,2	266,4 ± 2,0	107,1 ± 0,8
P26	6,900 ± 0,1	140,5 ± 0,8	79,10 ± 0,5
P27	12,80 ± 0,2	234,3 ± 1,8	103,1 ± 0,8
P28	846,9 ± 1,8	13281,0 ± 3,8	114,5 ± 0,9
P29	22,80 ± 0,2	431,6 ± 0,8	14,20 ± 0,5
P30	71,90 ± 0,6	1162,5 ± 6,7	79,50 ± 0,8
P31	19,40 ± 0,2	330,6 ± 1,8	115,0 ± 1,2
P32	19,10 ± 0,2	340,6 ± 2,2	104,7 ± 1,5
P33	8,400 ± 0,1	143,9 ± 0,8	113,8 ± 2,9

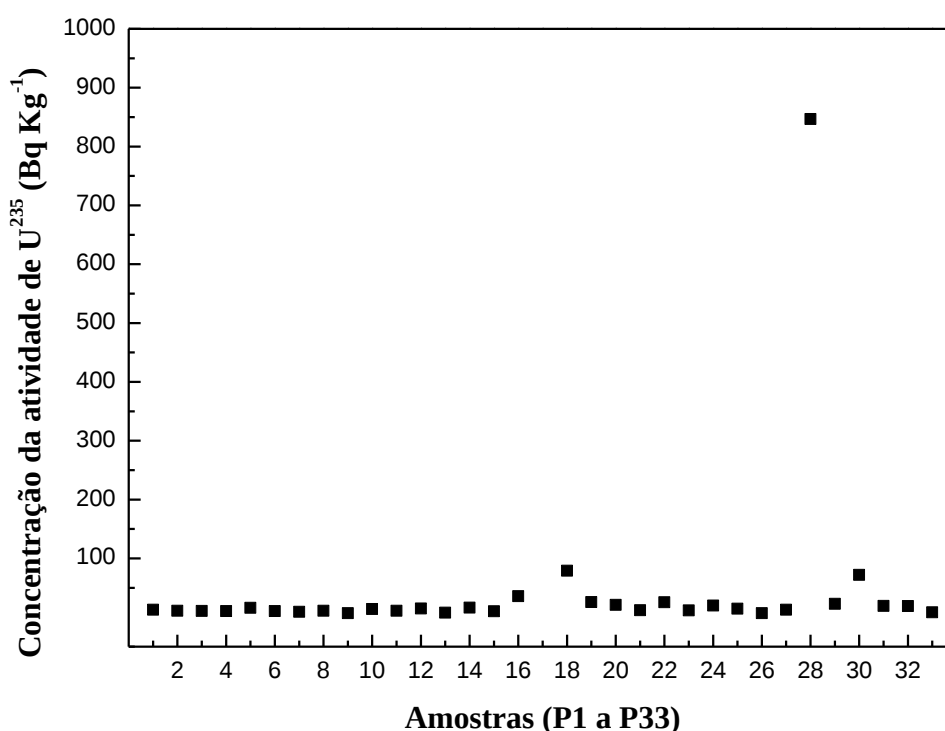
As atividades dos radionuclídeos nas amostras, de maneira geral, são heterogêneas principalmente ao se tratar dos valores atrelados à atividade de U^{235} comparado às atividades de U^{238} e Th^{232} .

Esse resultado já era esperado, uma vez que a quantidade do isótopo de massa 235 do urânio, naturalmente, é muito pequena. Sabe-se que para cada 1000 átomos de urânio total, apenas 7 são referentes ao U^{235} , ou seja, pode-se encontrar aproximadamente 0,72% em abundância natural desse radioisótopo, e em porcentagens mais significativas, por exemplo, a concentração de U^{238} que é de 99,2% e 100% para Th^{232} [80].

Os menores valores de atividade de U^{235} são de 6,800 e 6,900 Bq Kg⁻¹, respectivamente para as regiões de Sangemil e Oliveira do Hospital (rotatória). Tais regiões também apresentaram os menores valores médios, sendo de 12,90 Bq Kg⁻¹ para Sangemil e 11,40 Bq Kg⁻¹ para a rotatório de Oliveira do Hospital.

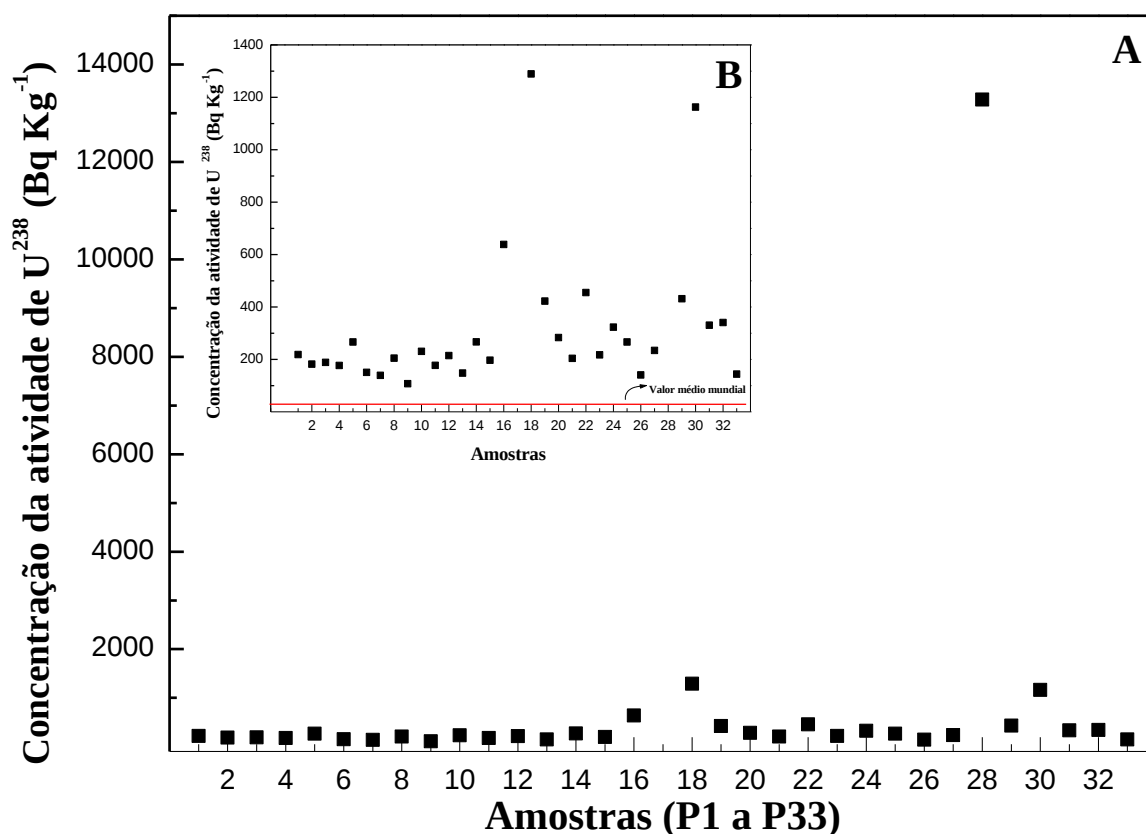
A região do Parque Municipal, também no município de Oliveira de Hospital, apresentou o maior valor médio de atividade de U^{235} , equivalente a 196,0 Bq Kg⁻¹. Essa média relativamente alta, pode ser justificado pelo valor de atividade de U^{235} no ponto 28, que chegou a 846,9 Bq Kg⁻¹, conforme observado na Figura 30.

Figura 30 - Concentrações das atividades de ^{235}U para cada ponto de amostragem.



Ao se tratar dos valores de atividade de U^{238} , ainda segundo dados da Tabela 7, verificou-se que um valor médio de $216,9 \text{ Bq Kg}^{-1}$ na região de Sangemil, onde no ponto 16 (P16) um valor mais alto de atividade do radioisótopo foi observado, superando $630,0 \text{ Bq Kg}^{-1}$. Esses valores são maiores que o valor médio mundial que equivale a 35 Bq Kg^{-1} [2], conforme pode-se verificar na Figura 31B.

Figura 31 - Concentrações das atividades de ^{238}U para o conjunto de pontos de amostragem, em (A) os pontos vão de P1 a P33; em (B) excluiu-se o ponto P28.



Nas regiões da Quinta, Penalva e na Rotatória, todas no município de Oliveira do Hospital, as médias das atividades referentes ao U^{238} foram de 549,7; 331,8; 213,7 Bq Kg^{-1} , respectivamente. No entanto, pode-se apontar uma contribuição muito significativa da atividade desse radioisótopo, especificamente no ponto 28 (P28) do Parque Municipal de Oliveira do Hospital, que extrapola o valor de $13280,0 \text{ Bq Kg}^{-1}$, que pode ser observado na Figura 31A.

Portanto, na Figura 31, têm-se uma combinação de gráficos, que indicam os valores de concentrações das atividades de U^{238} correspondente a cada ponto de amostragem, onde percebe-se que existe uma certa homogeneidade quando se considera

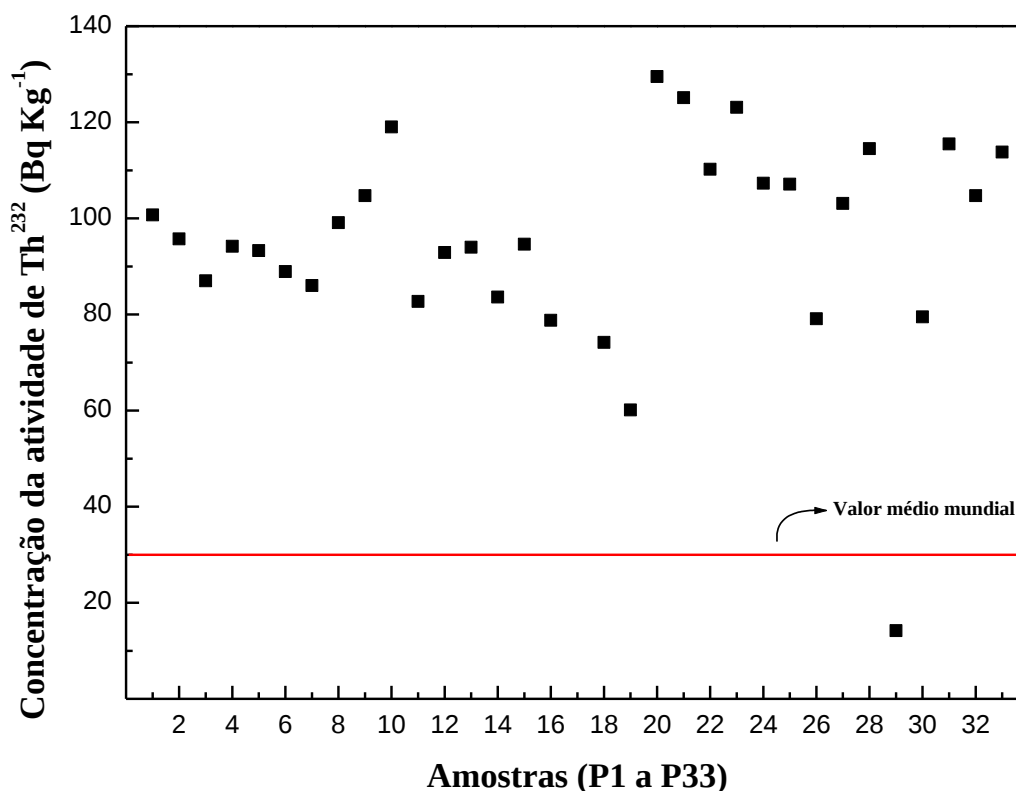
o valor da amostra em P28, conforme item B da mesma figura. Em B, optou-se em não considerar o valor no ponto 28, para facilitar a percepção da linha em vermelho que indica o valor médio mundial de concentração da atividade do U^{238} , verificando que todos os valores aferidos são superiores à média.

Com isso, a região do Parque Municipal apresentou o maior valor médio de atividade de U^{238} , que foi de $3019,3 \text{ Bq Kg}^{-1}$. Comparando com o valor médio mundial de U^{238} , nota-se um acréscimo de 86 vezes que justifica o enriquecimento de urânio nessas amostras, que pode estar ligado ao fato de serem rochas do tipo granítica com característica específica de mineralização de urânio.

Os valores médios de atividade de Th^{232} apresentaram baixa amplitude, sendo a região de Sangemil com atividade média de $94,4 \text{ Bq Kg}^{-1}$ e a região de Penalva com $113,6 \text{ Bq Kg}^{-1}$. Tais valores são maiores do que o valor médio mundial que é de 30 Bq kg^{-1} , indicando que essas amostras de rochas também são ricas em mineral de tório.

Conforme ilustração da Figura 32, verificou-se que apenas no ponto 29 (P29) o valor aferido é inferior ao valor da média anual para Th^{232} (indicado pela linha vermelha no gráfico), e para os demais pontos os valores são significativamente superiores.

Figura 32 - Concentrações das atividades de ^{235}Th para cada ponto de amostragem.



6.2 Correlação entre concentração de atividade de ^{238}U e ^{230}Th

A razão de atividade $K = (^{238}\text{U}/^{230}\text{Th})$, segundo Allegre et.al, quando difere numericamente de 1 sugere um provável desequilíbrio radioativo entre os isótopos [81]. A Tabela 8 indica a razão K para todos os pontos de amostragem.

Tabela 8 - Razão entre ($^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$) para cada ponto de amostragem.

Ponto	($^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$)	Ponto	($^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$)	Ponto	($^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$)
P1	1,040	P12	0,978	P23	1,377
P2	1,313	P13	1,014	P24	1,628
P3	1,395	P14	1,168	P25	1,697
P4	1,143	P15	1,064	P26	1,138
P5	0,949	P16	1,509	P27	1,070
P6	0,805	P17	0,889	P28	1,231
P7	0,806	P18	1,053	P29	1,535
P8	1,121	P19	0,874	P30	1,220
P9	0,663	P20	0,780	P31	1,360
P10	1,225	P21	0,915	P32	1,130
P11	0,968	P22	2,491	P33	0,682

Para a interpretação correta dos valores de K, entende-se que nos casos em que $k > 1$, há um excesso de ^{238}U em relação ao ^{230}Th . Nessa sentido, os pontos P1, P2, P3, P4, P8, P10, P14, P16, P18, P22, P23, P24, P25, P26, P27, P28, P29, P30, P31 e P32 apresentaram valores superiores a 1 na razão entre ($\text{U}^{238}/\text{Th}^{230}$), e todos condizem com o fator de maior valor de concentração da atividade de U^{238} em relação a Th^{230} .

Os pontos P5, P6, P7, P9, P11, P12, P17, P19, P20, P21 e P33 apresentam maiores valores referentes a concentração de atividade de Th^{230} em relação à atividade de U^{238} e portanto têm $k < 1$.

A maioria dos valores de K calculados se encontram em uma razão que varia entre 0,7 e 1,8; salvo uma exceção no ponto 22. Segundo Condomines *et al.* (1988), a razão k variando entre 0,7 e 1,8 é característica intrínseca de rochas ígneas recentes, confirmando tais perspectivas das amostras em estudo [82].

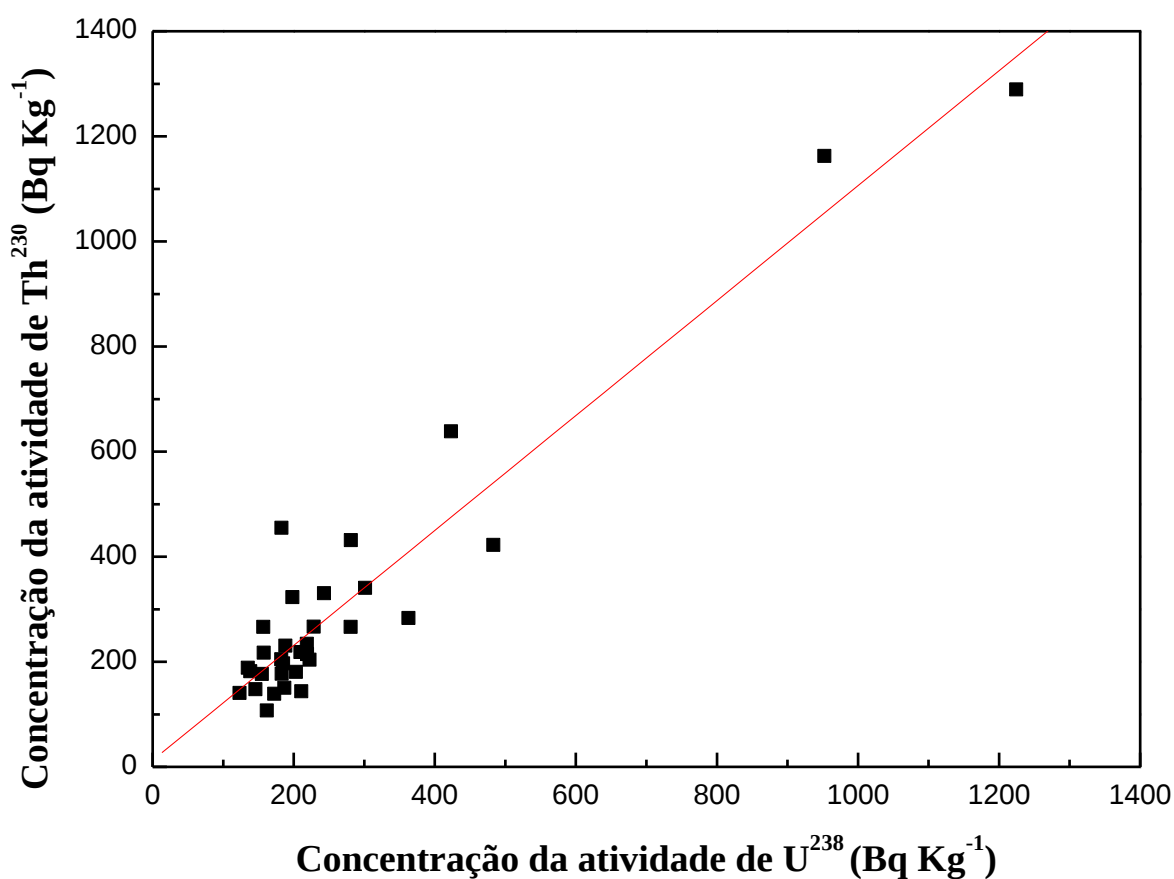
Ao se tratar do P22, sua localização refere-se a Penalva (Oliveira do Hospital), uma região que apresentou valores mais elevados de K. Esse resultado pode ser

explicado pelo fato da região apresentar um expressivo grau de esmagamento do granito com enclaves metassedimentares associados, favorecendo um maior desequilíbrio em relação aos demais pontos de amostragem.

Importante ressaltar, que o grau de deformação e esmagamento do granito está restritamente ligado ao fator de ser uma área de falhamento geológico, onde buscou-se amostras exclusivamente da caixa de falha, atentando-se aos mais variados graus de deformação existente no granito [82].

Quando as concentrações de U e Th são representadas em diagrama de correlação, como na Figura 33; pode-se perceber algumas condições como por exemplo, nesse caso que os pontos se alinham em uma reta passando pela origem, a razão Th/U permanece praticamente constante.

Figura 33 - Representação gráfica da razão Th/U.



Mesmo assim é possível observar uma sutil dispersão dos pontos, que pode ser explicada pelo provável processo de formação das rochas. De acordo com Gill, et.al (1992), considera-se que uma formação por processo de cristalização fracionada,

provavelmente gera uma dispersão do fracionamento das fases minerais que podem ser caracterizadas por uma pequena variação de coeficientes de urânio ou tório [83].

Ressalta-se que para plotar o gráfico da Figura 25, optou-se em desconsiderar o ponto 28 (P28) por apresentar valores extremamente altos de concentração dos radionuclídeos indicando uma provável anomalia devido a mineralização da área.

6.3 Relação de ^{226}Ra e ^{222}Rn

Conforme aferição do teor de rádio e radônio nas amostras do cenário 1 via medidor AlphaGuard em contentores metálicos, foi possível verificar os valores representativos para cada analito de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Teor de exalação de ^{226}Ra , ^{222}Rn e coeficiente de emanção (E).

Pontos	^{226}Ra (Bq Kg ⁻¹)	^{222}Rn (Bq Kg ⁻¹)	E	Pontos	^{226}Ra (Bq Kg ⁻¹)	^{222}Rn (Bq Kg ⁻¹)	E
P1	209,6	69,80	0,21	P18	567,3	247,9	0,34
P2	138,5	56,37	0,25	P19	223,6	110,5	0,23
P3	135,0	35,85	0,15	P20	197,4	89,9	0,21
P4	154,8	53,64	0,20	P21	158,3	35,7	0,20
P5	280,6	130,2	0,27	P22	208,7	76,3	0,24
P6	186,8	58,35	0,19	P23	118,1	72,5	0,19
P7	172,2	68,68	0,23	P24	256,3	101,2	0,29
P8	182,5	44,68	0,15	P25	189,3	60,1	0,20
P9	161,8	29,04	0,13	P26	134,5	40,2	0,22
P10	188,2	60,25	0,21	P27	112,2	50,1	0,25
P11	183,0	66,98	0,25	P28	1034,8	632,7	0,39
P12	218,9	114,1	0,30	P29	200,7	98,3	0,33
P13	145,7	37,28	0,16	P30	402,4	176,9	0,27
P14	228,4	133,2	0,35	P31	158,2	67,8	0,22
P15	184,9	59,63	0,19	P32	140,2	71,3	0,26
P16	422,9	200,1	0,31	P33	112,1	47,5	0,20
P17	145,7	11,38	0,16	-	-	-	-

Com relação ao ^{226}Ra exalado, tem-se um valor mínimo de 112,1 Bq Kg⁻¹ (P33) e máximo de 1034,8 Bq Kg⁻¹ (P28) . Para os valores referentes à exalação do gás radônio, verificou-se no ponto P17 o menor valor (11,38Bq Kg⁻¹), e em P28 o maior valor correspondendo a mais de 632,7 Bq Kg⁻¹. A maioria dos valores estão coerentes com aqueles já descritos na literatura sobre amostras de solos/rochas de regiões de granito, considerando os graus de alteração quando se trata de rochas.

Em relação ao P28, que apresentou o maior valor dentre os 33 pontos de amostragem, evidencia-se que existe uma anomalia ligada aos processos de mineralização da rocha, já discutido anteriormente no item 6.2

Com esses resultados da exalação de rádio e radônio, calculou-se o coeficiente de emanação das amostras de rochas graníticas, que também estão indicados na Tabela 9. Na literatura existem poucos dados disponíveis sobre o coeficiente de emanação, tampouco explicações e discussões que remetam à fatores que controlam sua variabilidade.

Contudo, em um estudo de revisão bibliográfica, Sakoda et al. (2011) indicou valores de coeficiente de emanação para granitos que variaram entre 0,04 e 0,40. Os dados referentes a esse estudo, os coeficientes de emanação variaram entre 0, 13 e 0,39 corroborando com os valores esperados para amostras graníticas [84].

Sabe-se que, de acordo com resultados de Pereira et. al, valores de coeficiente maiores que 0,12 estão ligados a amostras de granito biotítico porfirítico que segue exatamente as características das amostras coletadas na região de Sangemil [85]. No entanto, essa variabilidade nos valores, ou seja, a heterogeneidade observada nos valores do coeficiente de emanação, de acordo com Girault et al. (2011) pode estar associada ao grau de alteração das amostras de rocha [8].

6.4 Atividade de ^{222}Rn e ^{238}U *in situ*

Os resultados da aferição da atividade de ^{222}Rn estão representados na Tabela 10, conforme numeração dos pontos de amostragem. Nessa etapa, como já detalhado na metodologia, optou-se por uma amostragem do tipo composta para garantir que as características de cada área fossem mantidas e representativas.

Portanto, cada área de amostragem (pontos), indicou-se quantos furos para aferição de ^{222}Rn foram realizados. A tabela 10 ainda apresenta os valores da exalação de ^{222}Rn para cada um dos furos e o valor médio representativos em unidade de medida Bq m^{-3} .

Tabela 10 - Exalação de ^{222}Rn para cada ponto, média de exalação e quantidade de furos.

Pontos	Quantidade de furos	^{222}Rn (Bq m ⁻³)	Média(Bq m ⁻³)
P1.1	2	78.208	473.485
P1.2		868.762	
P2.3	2	62.592	183.992
P2.4		305.393	
P3.5	2	732.812	965.592
P3.6		1.198.373	
P4.7	2	431.569	559.592
P4.8		687.616	
P5.9	2	106.048	371.780
P5.10		637.513	
P6.11	2	467.968	273.280
P6.22		78.592	
P7.13	3	306.944	288.248
P7.14		371.247	
P7.15		186.554	
P8.16	1	38.711	38.711
P9.17	1	179.371	179.371
P10.18	2	508.109	254.350
P10.19		592	
P11.20	1	628.964	628.964
P12.21	1	1.379	1.379
P13.22	3	27.605	131.323
P13.23		278.642	
P13.24		87.723	
P14.25	2	121.600	311.866
P14.26		502.132	
P15.27	1	522.923	522.923
P16.28	2	981.675	1.295.474
P16.29		1.609.273	
P17.30	3	466.944	187.274
P17.31		58.671	
P17.32		33.207	

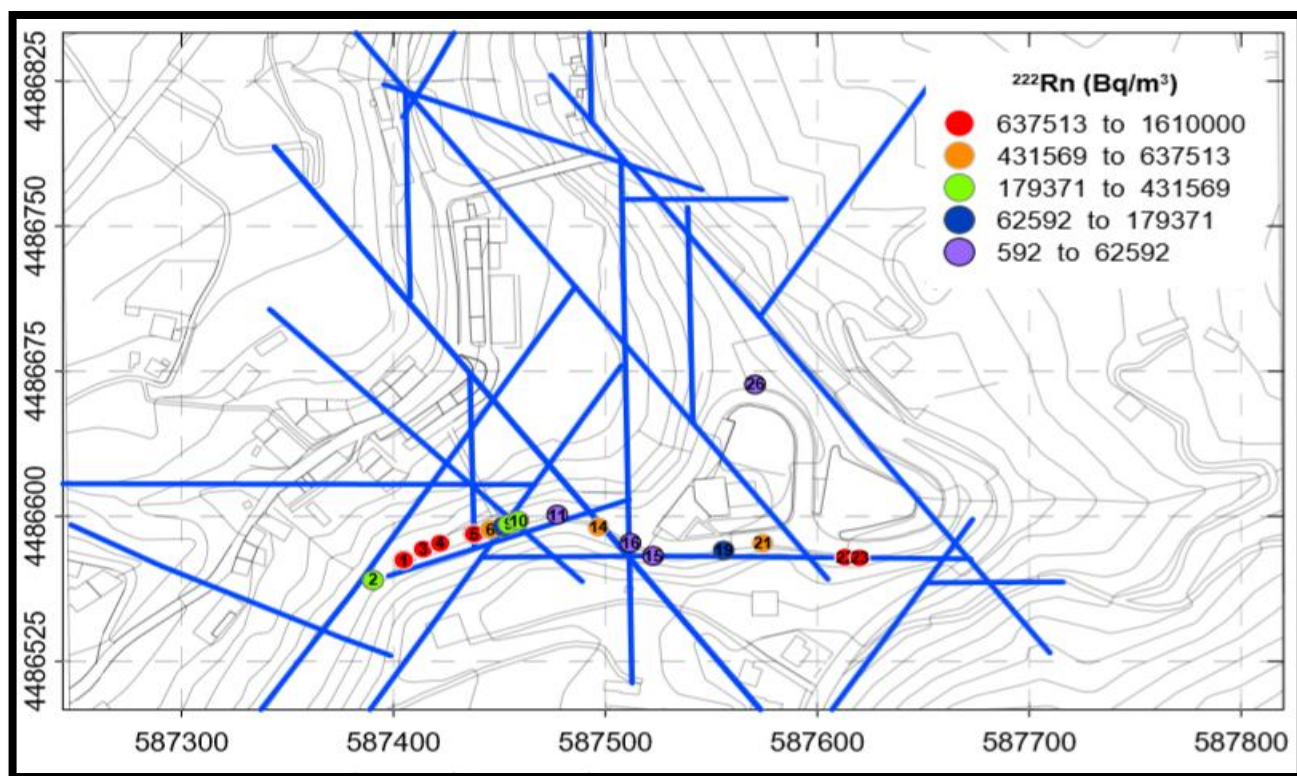
As concentrações de gás ^{222}Rn apresentaram uma ampla variação, entre 592 até 1.609.273 Bq m⁻³. Em média, as concentrações gás radônio em rochas graníticas e solos derivados de metassedimentos apresentaram valores mais elevados.

A Figura 34 ilustra a área de coleta na região de Sangemil, com as indicações dos lineamentos das falhas geológicas (linhas azuis), e os pontos de perfuração realizados no trabalho de campo. Os pontos em vermelho indicam maiores concentrações da exalação do gás radônio e em roxo os menores valores.

Portanto, os resultados obtidos para as concentrações de ^{222}Rn no leito das rochas podem ser agrupados em populações diferentes, representadas pelos pontos coloridos. A população com o menor valor de concentração de radônio (592 Bq m^{-3}) foi convencionada como o valor de fundo e pode estar ligada à litologia da região estudada, que é caracterizada pela presença de falhas levemente enriquecidas com urânio.

Os valores mais altos (chegando a $1.609.273 \text{ Bq m}^{-3}$) foram justificados como concentrações anômalas de gás radônio ligadas fortemente às falhas geológicas enriquecidas de urânio, com provável mineralização pontual desse analito, classificando tal ponto no bloco de falha como anômalo.

Figura 34 - Croqui da área de coleta em Sangemil, com indicação dos lineamentos das falhas geológicas (linhas azuis), e os pontos com seus respectivos valores de exalação de ^{222}Rn geogênico.



Em cada caso, ou seja, para cada valor das médias de exalação de radônio também verificou-se os valores da concentração de U total. Portanto, a Tabela 11 indica os valores de exalação de gás Rn e concentração da atividade de U total e ^{238}U .

Ao confrontar tais dados, observou-se claramente que para as áreas de maior exalação de Rn associou-se também maior concentração da atividade de urânio. Para os pontos P3 e P16, tem-se os maiores valores da média de exalação de ^{222}Rn , de 965.592 e

1.295.474 Bq m⁻³ respectivamente; e também apresentaram valores elevados para a concentração de atividade de urânio, sendo 17,7 e 28,7 ppm respectivamente.

Esse resultado propõe que as áreas que apresentaram valores extremamente elevados de exalação de Rn estão associados principalmente à altas atividades de urânio, fortalecendo a ideia da existência de regiões anômalas dentro dos blocos de falhas geológica que são enriquecidos de urânio, provavelmente decorrente de uma mineralização pontual da rocha.

Tabela 11 - Valores de exalação de R, atividade de U total e ²³⁸U.

Ponto	²²² Rn (Bq m ⁻³)	²³⁸ U (Bq Kg ⁻¹)	U (ppm)	Ponto	²²² Rn (Bq m ⁻³)	²³⁸ U (Bq Kg ⁻¹)	U (ppm)
P1	473.485	218,3	12,3	P10	254.350	230,7	11,8
P2	183.992	182,1	15,1	P11	628.964	177,3	14,6
P3	965.592	188,5	17,7	P12	1.379	214,4	15,4
P4	559.592	177,0	20,6	P13	131.323	147,8	17,8
P5	371.780	266,4	14,0	P14	311.866	266,9	15,5
P6	273.280	150,5	15,0	P15	522.923	197,0	19,1
P7	288.248	138,9	18,9	P16	1.295.474	638,6	28,7
P8	38.711	204,8	12,4	P17	187.274	180,6	12,7
P9	179.371	107,4	13,0	-	-	-	-

6.5 Atividade de ²²²Rn no cenário 2

Os dados das atividades de Rn para os pontos do cenário 2, estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores aferidos para atividade de Rn no cenário 2.

Pontos	Atividade Rn	DP (σ)	Pontos	Atividade Rn	DP (σ)
B1	801	±0,22	B9	3233	±0,94
B2	1972	±0,35	B10	3421	±1,22
B3	3151	±0,65	B11	525	±0,17
B4	3200	±0,65	B12	1394	±0,27
B5	3517	±2,30	B13	2848	±0,49
B6	633	±0,19	B14	3223	±0,77
B7	1713	±0,46	B15	3367	±0,78
B8	2850	±0,49	-	-	-

Ao comparar os valores de concentração de Rn no cenário 1 com os valores aferidos no cenário 2 (Tabela 10), fica evidente que nas regiões de Sangemil e Oliveira do Hospital os valores são mais elevados.

Sugere-se que essa constatação possa ser explicada devido as condições geogênicas das áreas de falhas geológicas, uma vez que a falha geológica característica do município de Presidente Prudente encontra-se soterrada em maior profundidade, e provavelmente devido às características do solo que encobre tal falha, o gás radônio encontre maiores barreiras e dificuldades em ser exalado.

No entanto, as falhas características em Portugal são do tipo afloradas e possivelmente por essa condição a exalação do gás seja facilitada.

Nessas condições, os valores de atividade de Rn no município de Presidente Prudente devem ser levadas em consideração quando comparados com dados obtidos na Índia e Estados Unidos, conforme indicação da Tabela 13.

Tabela 13 - Valores de C_{Rn} para amostras de solo de diferentes regiões.

*Taxa máxima de exalação de Rn admitida em solos de minas subterrâneas nos Estados Unidos.

Região	C_{Rn}	Referência
Presidente Prudente/SP - Brasil	6,03 - 14,30	Presente trabalho
Hamirpur - Índia	30,0 - 228,0	Mehra & Bala [86]
Garhwal Himalaya - Índia	10,0 - 233,0	Bourai [87]
Estados Unidos	0,74*	Lubin [88]

Nota-se com a comparação, que a atividade de Rn em amostras de solos de regiões que apresentam falhas geológicas são mais elevados que em regiões como Hamirpur e Garhwal Himalaya, na Índia. Ao compara com o valor admitido em solos de minas subterrâneas nos Estados Unidos, os valores de atividade de Rn em áreas de falhas geológicas se encontram demasiadamente maiores.

6.6 Avaliação granulométrica das amostras de solo

As análises granulométricas realizadas nas 15 amostras de solo do cenário 2, na área de intersecção das falhas geológicas, possibilitou a classificação das texturas dos solos baseando-se no Diagrama das Classes Texturais [48] conforme as porcentagens de areia, argila e silte. Tais dados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Dados granulométricos referentes as amostras de solos.

Localização do ponto de coleta	Profundidade (cm)	Areia (g Kg ⁻¹)	Silte (g Kg ⁻¹)	Argila (g Kg ⁻¹)	Classificação Textural
B1	15	680,3	259,6	60,00	Arenosa
	30	803,0	106,9	80,64	Arenosa
	60	809,3	80,64	110,0	Arenosa
B2	15	848,0	83,97	68,00	Arenosa
	30	809,0	96,98	94,00	Arenosa
	60	855,9	28,10	116,0	Arenosa
B3	15	840,8	89,14	70,00	Arenosa
	30	854,5	53,47	66,44	Arenosa
	60	809,5	66,44	124,0	Arenosa
B4	15	808,5	115,4	76,00	Arenosa
	30	784,5	95,43	120,0	Arenosa
	60	753,5	94,48	152,0	Média
B5	15	791,1	102,8	106,0	Arenosa
	30	696,9	107,0	196,0	Arenosa
	60	661,4	30,59	308	Média
B6	15	848,0	67,98	84,00	Arenosa
	30	806,3	85,65	108,0	Arenosa
	60	849,2	40,77	110,0	Arenosa
B7	15	849,5	68,45	82,00	Arenosa
	30	831,4	74,59	94,00	Arenosa
	60	817,8	68,15	114,0	Arenosa
B8	15	827,0	89,00	84,00	Arenosa
	30	831,4	66,53	102,0	Arenosa
	60	745,8	134,1	120,0	Arenosa
B9	15	829,0	84,94	86,00	Arenosa
	30	823,0	56,93	120,0	Arenosa
	60	788,9	71,08	140,0	Arenosa
B10	15	845,8	34,19	102,0	Arenosa
	30	756,5	75,45	168,0	Média
	60	776,3	3,70	220,0	Média
B11	15	895,0	36,93	68,00	Arenosa
	30	826,6	85,34	88,00	Arenosa
	60	824,9	63,03	112,0	Arenosa
B12	15	821,8	88,11	90,00	Arenosa
	30	810,5	81,42	108,0	Arenosa
	60	784,4	101,5	114,0	Arenosa
B13	15	894,1	15,84	90,00	Arenosa
	30	858,8	33,15	108,0	Arenosa
	60	840,6	41,33	118,0	Arenosa
B14	15	843,7	62,26	94,00	Arenosa
	30	840,7	57,29	102,0	Arenosa
	60	726,1	143,8	130,0	Arenosa
B15	15	822,4	77,56	100,0	Arenosa
	30	636,4	209,57	154,0	Média
	60	681,5	104,41	214,0	Média

Os dados da análise textural revelaram que os solos, na sua maioria, são caracterizados por porcentagens relativamente altas da fração areia, classificando-os em classe textural arenosa, diferenciando-se apenas no ponto B4, B5, B10 e B15 que possuem porcentagens relativamente mais altas de argila classificando-os em média.

Solos com alto teor de areia, geralmente, possuem baixa capacidade de retenção de água haja vista sua alta taxa de drenagem. Em contrapartida, possuem boa aeração e uma propriedade intrínseca de rápida decomposição da matéria orgânica e alto potencial de lixiviação de poluentes. É importante ressaltar que existem poucos dados sobre a perda de chumbo no perfil do solo por lixiviação.

6.7 Concentração de Pb para o cenário 1

Os valores de concentração de chumbo total quantificados via método eletroquímico (voltametria de redissolução anódica por adição múltipla de padrão), para o cenário 1, estão listados na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores de concentração de Pb total para os pontos de coleta do cenário 1.

Ponto de coleta	[Pb] mg Kg ⁻¹	DP (σ)	R
P1	1,709	±0,13	0,994
P2	7,589	±0,83	0,993
P3	5,137	±0,48	0,999
P4	4,517	±0,26	0,999
P5	4,465	±0,42	0,999
P6	5,327	±0,14	0,999
P7	4,678	±0,21	0,998
P8	5,291	±0,19	0,999
P9	7,166	±0,27	0,998
P10	9,655	±0,75	0,997
P11	7,487	±0,90	0,998
P12	22,34	±0,18	0,997
P13	10,74	±0,87	0,998
P14	37,58	±0,33	0,999
P15	48,33	±0,18	0,997
P16	4,857	±0,56	0,999
P17	17,31	±0,37	0,999
P18	100,3	±1,10	0,993
P19	44,67	±0,43	0,996
P20	32,11	±0,69	0,997
P21	77,12	±0,45	0,997
P22	1,790	±1,07	0,995
P23	10,36	±1,56	0,997
P24	7,165	±0,98	0,998
P25	5,157	±0,85	0,999
P26	1,518	±0,98	0,997
P27	5,827	±1,05	0,995
P28	4,084	±1,12	0,996
P29	2,450	±1,62	0,998
P30	14,24	±1,29	0,999
P31	4,225	±2,96	0,992
P32	6,693	±3,16	0,993
P33	9,530	±2,50	0,998

A partir desses dados, observou-se que as concentrações de Pb total variaram no intervalo de 1,518 a 100,3 mg kg⁻¹, e também foi possível calcular a média das concentrações para cada região, que são: Sangemil (12,01 mg kg⁻¹); Oliveira do Hospital/Quinta (63,55 mg kg⁻¹); Oliveira do Hospital/Penalva (6,438 mg kg⁻¹); Oliveira do Hospital/Rotatória (4,167 mg kg⁻¹) e Oliveira do Hospital/ Parque Municipal (6,870 mg kg⁻¹).

Ao comparar tais médias com outros valores da literatura, por exemplo com o teor médio de chumbo em rochas ígneas (granitos) do Canadá (12 mg kg⁻¹), tem-se que apenas para a região da Quinta em Oliveira do Hospital houve um excesso de 51,55 mg kg⁻¹, uma vez que para as demais regiões os valores encontraram-se menores ou iguais a média [89].

Os valores máximos permitidos de Pb em solos da Comunidade Europeia e Estados Unidos [90, 91], são de 50 a 300 mg kg⁻¹ dependendo da finalidade, e nesse sentido todos os valores aferidos no cenário 1 encontram-se dentro da permissão constitucional.

A região da Quinta (em Oliveira do Hospital), quando consideramos a totalidade de pontos coletados no cenário 1, apresentou um valor máximo de 100,3 mg kg⁻¹ (P18) de Pb total. Esse valor pode ser justificado de acordo com seu teor de ²³⁸U, que também é elevado (é o segundo maior valor de concentração de atividade do U), chegando a mais 1280 Bq kg⁻¹, conforme dados da Tabela 16.

Ainda para o ponto 18 (P18) observou-se que o teor de ²¹⁰Pb, analogamente ao que acontece com a atividade de ²³⁸U, também apresentou valor mais elevado (949,1 Bq Kg⁻¹). Esperava-se tal resultado, partindo do pressuposto que o ²¹⁰Pb não seja o isótopo mais estável, mas apresenta maior tempo de meia-vida (22,5 anos), promovendo um favorecimento quanto a sua maior disponibilidade no meio em que exista urânio.

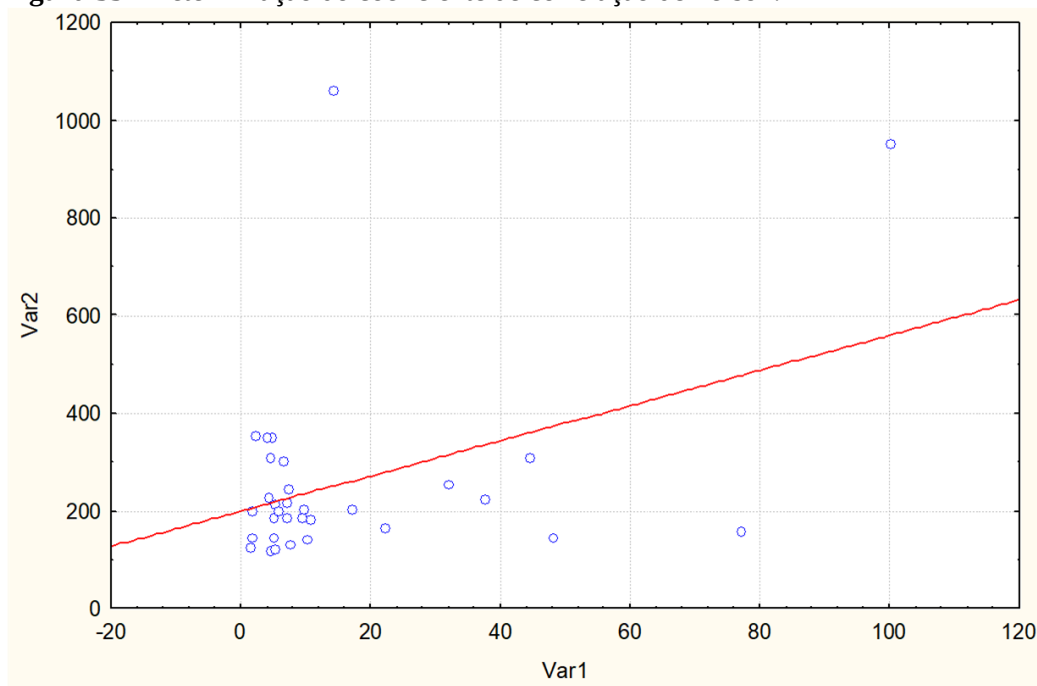
Tabela 16 - Valores de concentração de Pb total, ^{210}Pb e ^{238}U para o cenário 1.

Pontos	Pb _{total} (ppm)	^{238}U (Bq Kg ⁻¹)	^{210}Pb (Bq Kg ⁻¹)	Pontos	Pb _{total} (ppm)	^{238}U (Bq Kg ⁻¹)	^{210}Pb (Bq Kg ⁻¹)
P1	1,709	218,3	145,2	P18	100,3	1289,2	949,1
P2	7,589	182,1	131,6	P19	44,67	422,3	309,0
P3	5,137	188,5	144,1	P20	32,11	283,4	252,8
P4	4,517	177,0	116,7	P21	77,12	203,9	157,9
P5	4,465	266,4	227,2	P22	1,790	455,2	197,5
P6	5,327	150,5	211,6	P23	10,36	217,2	140,8
P7	4,678	138,9	309,1	P24	7,165	323,0	215,4
P8	5,291	204,8	121,2	P25	5,157	266,4	185,0
P9	7,166	107,4	183,4	P26	1,518	140,5	124,6
P10	9,655	230,7	200,9	P27	5,827	234,3	199,8
P11	7,487	177,3	244,2	P28	4,084	13281,0	11510,9
P12	22,34	214,4	164,2	P29	2,450	431,6	353,6
P13	10,74	147,8	181,5	P30	14,24	1162,5	1059,6
P14	37,58	266,9	222,6	P31	4,225	330,6	348,8
P15	48,33	197,0	143,9	P32	6,693	340,6	302,2
P16	4,857	638,6	349,0	P33	9,530	143,9	184,3
P17	17,31	180,6	200,7	-	-	-	-

Ao analisar os dados do ponto 1 (P1), verifica-se que ele se encontra entre os pontos com menor concentração de ^{210}Pb sendo coerente com seu teor de chumbo total de 1,709 mg kg⁻¹. Diferentemente dessa correlação, o ponto 28 (P28) que apresenta elevados valores de concentração de ^{210}Pb e ^{238}U não apresentou alto teor de Pb total, e pode ser justificado pelo fato de ser um ponto considerado como anômalo dentro do bloco de falha geológica.

Para verificar o grau de correlação linear entre as variáveis quantitativas, utilizou-se da determinação do coeficiente de correlação de Person (p), que conforme ilustração da Figura 35 é possível perceber uma relação linear entre as duas variáveis quantitativas, Var 1 e Var 2 que representam o valor da atividade de Pb total e o teor de ^{210}Pb .

Figura 35 - Determinação do coeficiente de correlação de Person.



O coeficiente de correlação de Person (p) foi de 0,48 e representa uma relação positiva moderada entre as variáveis, que pode ser observado através da interpretação da Figura 26, onde verifica-se que alguns pontos encontram-se muito próximos à linha enquanto outros estão distantes dela.

O coeficiente de correlação de Pearson é muito sensível a valores extremos de dados, ou seja, um único valor que destoa do conjunto de dados pode alterar significativamente o valor do coeficiente. Justamente por isso, optou-se em não utilizar dos valores relacionados ao ponto 28 (P28).

6.8 Concentração de Pb total nas amostras de solo do cenário 2

A partir da análise quantitativa de Pb nos pontos de coleta na região de intersecção de falhas geológicas (pontos B1 a B15), observou-se que as concentração variaram no intervalo de 23,41 a 371,23 mg kg⁻¹, e o desvio padrão máximo correspondeu a 9,63 conforme dados da Tabela 17.

Tabela 17 - Valores de concentração de Pb e desvio padrão para amostras de cenário 2.

Ponto de coleta	Horizonte (cm)	[Pb] mg Kg ⁻¹	DP (σ)	R
B1	15	36,16	±1,50	0,999
	30	68,73	±3,40	0,995
	60	109,1	±2,80	0,998
B2	15	42,24	±2,62	0,999
	30	75,29	±7,42	0,993
	60	134,3	±1,51	0,998
B3	15	46,00	±3,27	0,999
	30	82,86	±4,90	0,993
	60	163,5	±1,60	0,995
B4	15	52,39	±3,80	0,999
	30	91,64	±5,60	0,993
	60	208,0	±9,63	0,998
B5	15	58,56	±2,30	0,998
	30	96,14	±2,73	0,997
	60	371,2	±2,22	0,996
B6	15	32,33	±2,70	0,992
	30	65,01	±3,08	0,996
	60	102,9	±0,48	0,999
B7	15	40,63	±1,13	0,999
	30	73,17	±0,55	0,999
	60	114,4	±1,33	0,999
B8	15	45,85	±4,08	0,997
	30	80,30	±0,68	0,999
	60	148,2	±1,30	0,999
B9	15	51,17	±2,50	0,999
	30	91,33	±1,50	0,999
	60	188,7	±1,31	0,998
B10	15	55,17	±4,79	0,999
	30	92,67	±0,53	0,999
	60	303,5	±0,95	0,997
B11	15	23,41	±0,50	0,999
	30	62,27	±0,56	0,999
	60	97,62	±5,62	0,999
B12	15	37,20	±1,93	0,991
	30	72,15	±7,1	0,995
	60	113,1	±0,77	0,999
B13	15	44,03	±1,52	0,999
	30	75,82	±8,76	0,993
	60	141,75	±0,47	0,999
B14	15	50,45	±2,08	0,999
	30	84,50	±0,88	0,997
	60	181,3	±5,30	0,998
B15	15	53,34	±1,17	0,997
	30	91,68	±0,59	0,999
	60	235,7	±1,62	0,996

Segundo a CETESB, todos os valores encontrados de concentração de chumbo são maiores que os valores de referência, e apenas 17 desses estão abaixo do valor de prevenção que corresponde a 72 mg Kg^{-1} .

Em sete pontos (B3, B4, B5, B10, B14 e B15) as concentrações de chumbo excederam os valores tanto de referência de qualidade quanto de prevenção, encaixando-se nos valores de intervenção, que para área rural é de 150 mg Kg^{-1} , indicando um excedente que variou de 9 a 147 %.

Tais valores são considerados elevados uma vez que podemos compará-los com estudos realizados em amostras de solos das margens de estradas em regiões metropolitanas, com intenso tráfego rodoviário e grande volume de água de escoamento superficial das rodovias, e que mesmo assim apresentaram concentrações de Pb com variação entre 2,1 a $13,3 \text{ mg kg}^{-1}$ (ainda dentro do valor de referência de qualidade) [92].

Segundo dados publicados em 2016, amostras de solos de regiões de falhas geológicas do município de Presidente Prudente apresentaram valores de concentração de chumbo total que variaram no intervalo de 271,22 a $843,30 \text{ mg kg}^{-1}$, ou seja, valores maiores que os encontrados nos 15 pontos de amostragens na área rural do mesmo município, que podem ser justificados pelo fato da região estar inserida em uma área de intersecção de falhas geológicas enquanto que a área que apresentou maiores concentrações está inserida entre duas falhas geológicas paralelas, denominada de área de basculamento.

Ainda segundo Moreira Silva et.al, os valores das concentrações de Pb em amostras de solos na zona rural localizada no Distrito de Montalvão (município de Presidente Prudente), onde não há indicativos de falhas geológicas, variaram no intervalo de 6,83 a $15,95 \text{ mg kg}^{-1}$.

Tais valores, demasiadamente menores quando comparados com as concentrações de chumbo da zona rural que apresenta forte indício de falha geológica, indicam que existe naturalmente uma maior disponibilidade desse metal, uma vez que pode estar atrelado ao decaimento radioativo de gás radônio que gera Pb como elemento mais estável.

Quando comparamos a concentração de chumbo em regiões rurais da Austrália, onde quantificou-se até 14 mg Kg^{-1} [93], com os valores obtidos na zona rural do município de Presidente Prudente (cenário 2) , foi possível perceber que a região

caracterizada com falha geológica apresenta concentrações mais elevadas de chumbo, comprovando a maior disponibilidade desse metal em áreas de falhas geológicas.

6.9 Relação entre concentração de Pb e fração de argila em amostras de solo do cenário 2

As porcentagens da fração argila variaram de 6 a 30,8% nos pontos de coletas de amostras. A concentração de chumbo nos solos pode variar em função da disponibilidade de húmus, matéria orgânica e argila, sendo o parâmetro argila o mais importante em solos tropicais [94]. Segundo Xian, mais de 43% do chumbo presente no solo encontram-se na fração orgânica, sendo o restante ligado a outros componentes do sistema solo, como óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, carbonatos e fosfatos [95].

Se houver excesso de carga negativa na superfície do grão, pode acontecer uma atração dos cátions da fase líquida do solo, bem como de outros grãos. Este fenômeno de adsorção (ligação fraca e reversível de íons) é denominado de capacidade de troca de cátions (CTC). É natural, que as partículas com grande área superficial específica apresentem maior CTC. De fato, a CTC só é significativa nas partículas da fração argila. Nesse caso é possível que haja substituição de silício (Si^{+4}) e alumínio (Al^{+2}) por Pb^{+4} e Pb^{+2} respectivamente [96].

Nesse sentido, conforme dados da Tabela 18, nota-se que a concentração de chumbo aumenta nos horizontes onde a porcentagem de argila é maior, confirmando a propriedade intrínseca da argila de capacidade de troca de cátions.

Tabela 18 - Valores de concentração de Pb e fração de argila para os horizontes de cada perfil de solo do cenário 2.

Pontos de coleta	Profundidade (cm)	Argila (g Kg ⁻¹)	[Pb] mg Kg ⁻¹
B1	15	60	36,16
	30	90	68,73
	60	110	109,09
B2	15	68	42,24
	30	94	75,29
	60	116	134,33
B3	15	70	46,00
	30	92	82,86
	60	124	163,55
B4	15	76	52,39
	30	120	91,64
	60	152	208,03
B5	15	106	58,56
	30	196	96,14
	60	308	371,23
B6	15	84	32,33
	30	108	65,01
	60	110	102,90
B7	15	82	40,63
	30	94	73,17
	60	114	114,43
B8	15	84	45,85
	30	102	80,30
	60	120	148,24
B9	15	86	51,17
	30	120	91,33
	60	140	188,76
B10	15	102	55,17
	30	168	92,67
	60	220	303,55
B11	15	68	23,41
	30	88	62,27
	60	112	97,62
B12	15	90	37,20
	30	108	72,15
	60	114	113,09
B13	15	90	44,03
	30	108	75,82
	60	118	141,75
B14	15	94	50,45
	30	102	84,50
	60	130	181,32
B15	15	100	53,34
	30	154	91,68
	60	214	235,73

Pode-se perceber também, conforme tabela 18, que para todos os pontos de coleta as concentrações de argila tendem a crescer de acordo com o aumento da profundidade no perfil do solo.

Consequentemente verificou-se um aumento na concentração de chumbo total nos horizontes mais profundos (60 cm) de cada perfil, provando que nessa região a disponibilidade desse metal provavelmente ocorre devido ao fator natural da presença de falhas geológica que emana gás radônio e promove aumento da concentração do metal.

Portanto, segundo interpretação desses dados, propõe-se que a origem do chumbo pode estar diretamente ligada a emissão do gás radônio, que é oriunda da base inferior do perfil do solo, mais especificamente das anomalias da rocha matriz (falhas geológicas).

6.10 Relação entre concentração de Pb, fração de argila e atividade de Rn no cenário 1

Para melhor entendimento da relação entre concentração de chumbo total, fração de argila e atividade de radônio na amostras do cenário 1, considerou-se os maiores valores obtidos para concentração de Pb e fração de argila que foram relacionados com as atividades de Rn, conforme dados apresentados na Tabela 19.

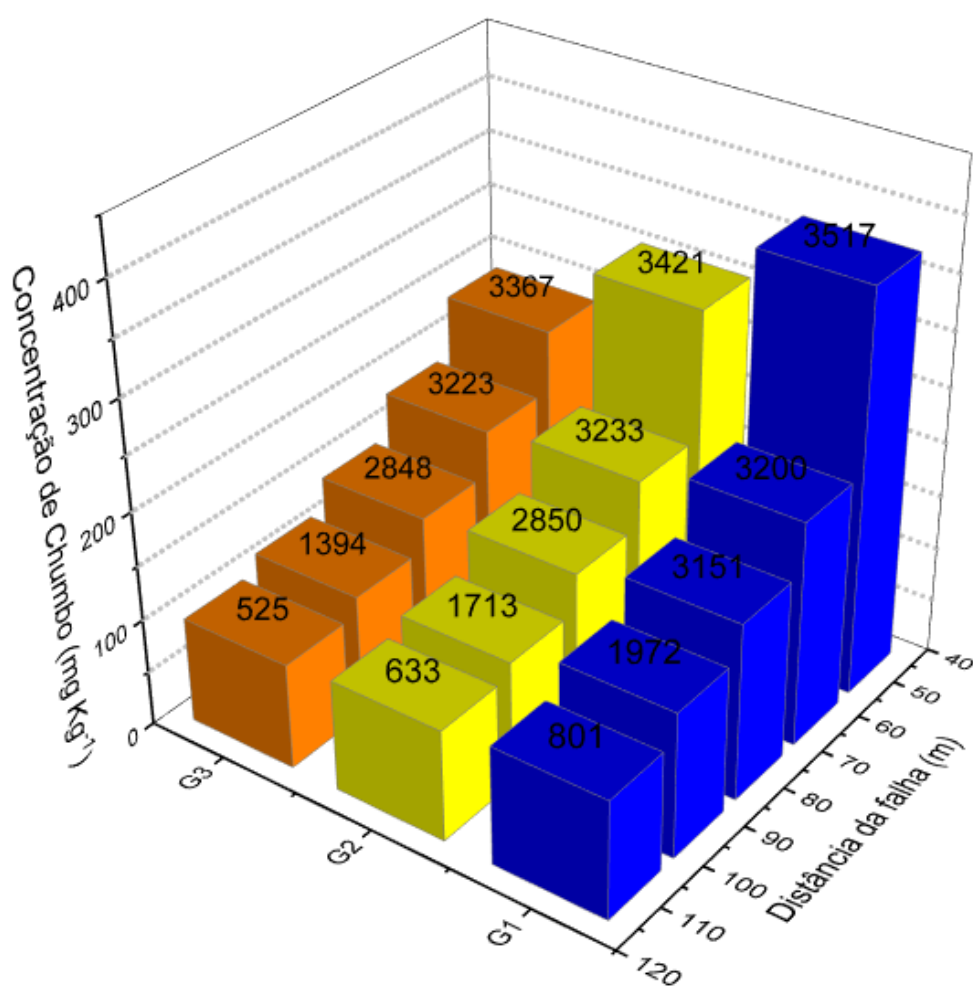
Tabela 19 - Valores de [Pb], atividade de Rn e fração de argila.

Ponto de coleta	[Pb] mg Kg⁻¹	Argila (g Kg⁻¹)	Atividade de Rn
B1	109,0	110,0	801
B2	134,3	116,0	1972
B3	163,5	124,0	3151
B4	208,0	152,0	3200
B5	371,2	308,0	3517
B6	102,9	110,0	633
B7	114,4	114,0	1713
B8	148,2	120,0	2850
B9	188,7	140,0	3233
B10	303,5	220,0	3421
B11	97,62	112,0	525
B12	113,0	114,0	1394
B13	141,7	118,0	2848
B14	181,3	130,0	3223
B15	235,7	214,0	3367

Os dados indicam que nos pontos, B5, B10 e B15 tem-se os maiores valores para os três parâmetros analisados. Esses pontos encontram-se mais próximos à falha geológica e por isso acredita-se que podem sofrer maior influência principalmente da exalação e emanção de gás radônio e consequentemente apresentarem maiores concentrações de chumbo total. A concentração de chumbo total também está relacionada ao fato da disponibilidade de argila no solo, que nesses mesmos pontos são mais elevadas quando comparado com os demais.

Para melhor visualização do comportamento desses parâmetros em relação aos 15 pontos de amostragens, plotou-se a Figura 36 que apresenta os valores de concentração de chumbo e atividade de Rn para cada ponto e suas devidas distâncias (em metro) em relação a localização da falha geológica.

Figura 36 - Distribuição dos valores de atividade de Rn, concentração de Pb e posição em relação a falha geológica para os pontos do cenário 2.



Observa-se que quanto maior a distância dos pontos de coleta em relação à falha geológica, os valores de concentração de chumbo e atividade de Rn tendem a diminuir, bem como a fração de argila nas amostras de solos.

Portanto, nos pontos B1, B6 e B11 (os mais distantes da falha geológica), as concentrações de chumbo total variam entre 97,62 a 109,0 mg Kg⁻¹ enquanto que para os pontos B5, B10 e B5, os mais próximos à falha, apresentam valores de até 371,2 mg Kg⁻¹.

Os maiores valores de atividade de radônio seguem esse mesmo padrão, ou seja, para o ponto B5 tem-se um valor de 3517 Bq m⁻³, seguidos dos pontos B10 e B15. Para o ponto B11 tem-se um valor de atividade de Rn de 525 Bq m⁻³, que representa a menor atividade de gás Rn dentro da malha proposta para as coletas.

Nesse sentido, pode-se verificar uma coerência quanto ao aumento dos valores de atividade de Rn e concentração de chumbo, em função da proximidade dos pontos à localização da falha geológica.

Para uma melhor observação e análise dessa distribuição de valores tanto de concentração de chumbo quanto atividade de radônio, foram desenvolvidos mapas de *Kernel*, que identificam e representam as áreas com maior concentração de cada variável.

Portanto, de acordo com a Figura 37, tem-se o diagnóstico estatístico das concentrações de chumbo para cada ponto de amostragem no cenário 2, onde nas áreas em vermelho temos os valores mais elevados. Percebe-se que nos pontos mais próximos à falha geológica há maior intensidade pontual desse fenômeno. Pode-se propor que existe uma influência quanto ao aumento da concentração desse metal em áreas com maior proximidade de falhas geológicas.

Conforme ilustração da Figura 38, que indica a distribuição dos valores de atividade de radônio (cenário 2), nota-se a mesma estimativa que ocorreu para a análise de concentração de Pb, provando que nesse caso a atividade de gás Rn também é maior em áreas mais próximas das falhas geológicas.

Figura 37 - Mapa de *Kernel* para a distribuição de chumbo em relação ao distanciamento da falha geológica.

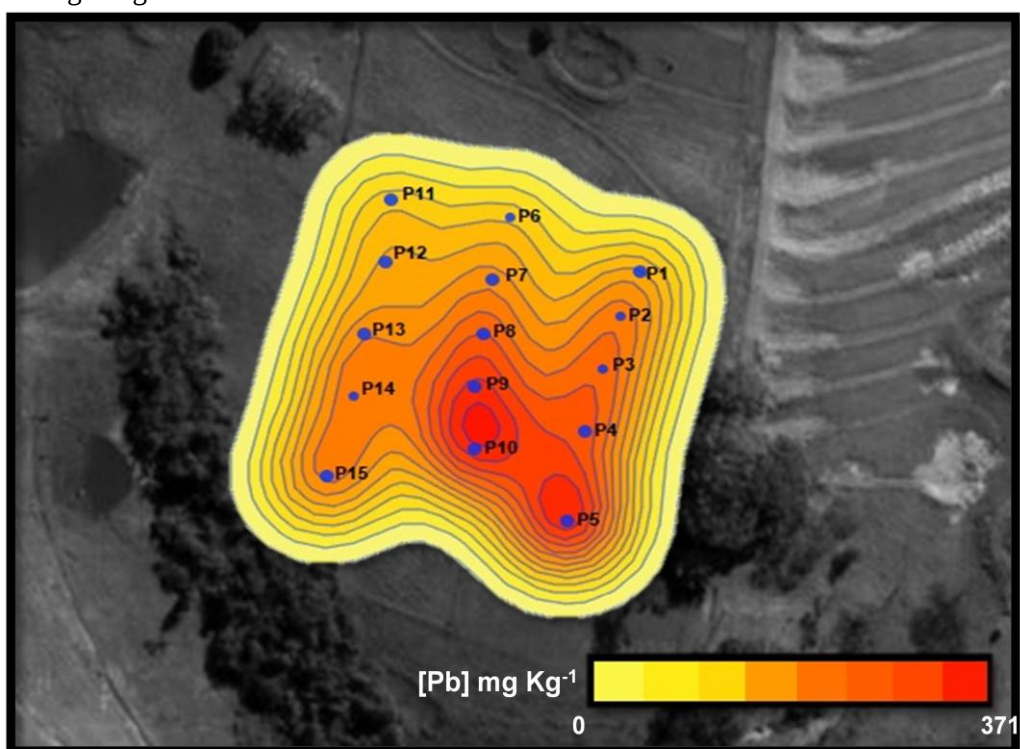
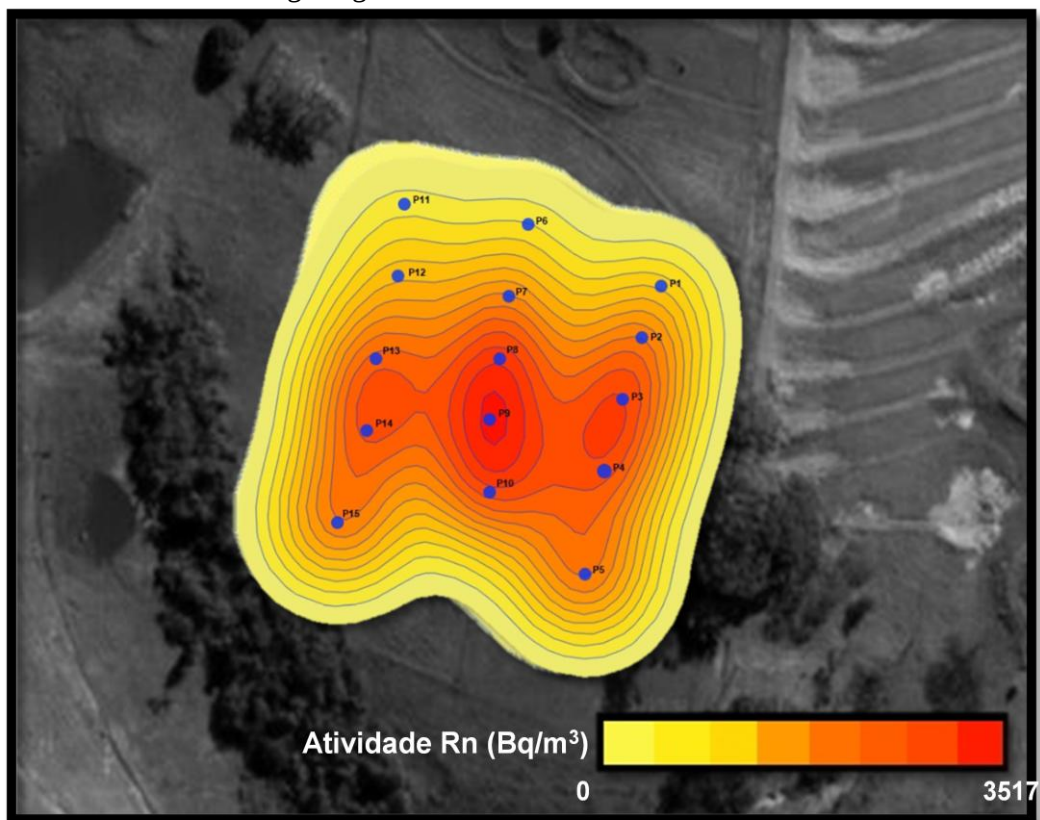


Figura 38 - Mapa de *Kernel* para a distribuição dos valores de atividade de Rn em relação ao distanciamento da falha geológica.



6.11 Comparação entre concentração de Pb total para os cenários 1 e 2

Ao confrontar os dados referentes às concentrações de chumbo total das amostras dos cenários 1 e 2, nota-se que o teor de Pb para as amostras do primeiro cenário são mais elevados.

As amostras do cenário 1, mesmo apresentando valores radiométricos mais elevados, característicos de regiões de falhas geológicas e até mesmo de áreas enriquecidas de urânio, indicaram concentrações de Pb total relativamente baixas, sendo consideradas dentro na média natural de granitos. Esse resultado pode estar ligado ao fato de tais amostras serem livres da fração argilosa em suas composições.

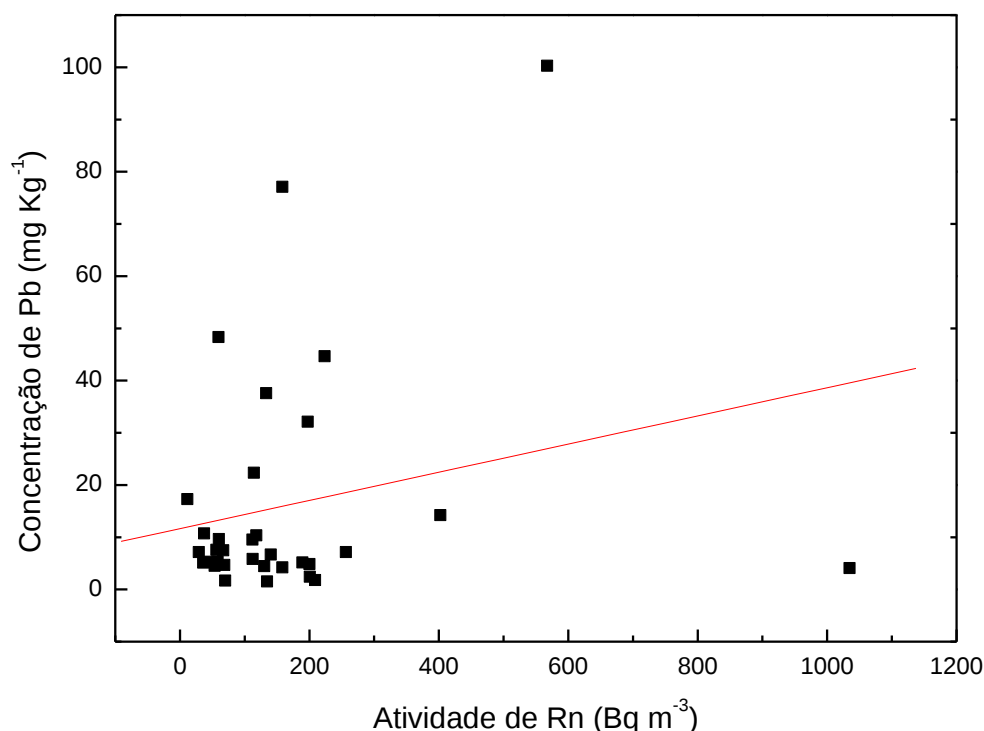
Ainda tratando-se dessa comparação, é importante ressaltar que no cenário 2 a emanção de gás Rn foi relativamente menor em relação ao cenário 1, mesmo fazendo parte de uma região caracterizada por falhas geológicas. Entende-se que justamente pelo fator da falha geológica no município de Presidente Prudente ser mais profunda, exista maiores interferentes que prejudiquem a exalação e emanção do gás.

Diferentemente dessa condição, as regiões de falhas estudadas no cenário 1 apresentavam caráter de afloramento, e que provavelmente proporcione condições que promova maiores teores de emanção e exalação de ^{222}Rn .

6.12 Correlação de atividade de Rn e concentração de Pb total para ambos os cenários

Para verificar o grau de correlação linear entre as variáveis quantitativas, atividade de Rn e concentração de Pb, para o cenário 1 (Portugal), plotou-se o gráfico representado na Figura 39.

Figura 39 - Determinação do coeficiente de correlação de Person para as variáveis concentração de Pb e atividade de Rn para o cenário 1.



Segundo análise da Figura 39, percebeu-se uma relação de baixa magnitude entre as variáveis, que pode estar atrelada ao fato das amostras serem livres de fração argila, uma vez que são rochas do tipo graníticas e consequentemente apresentaram menor concentração de chumbo.

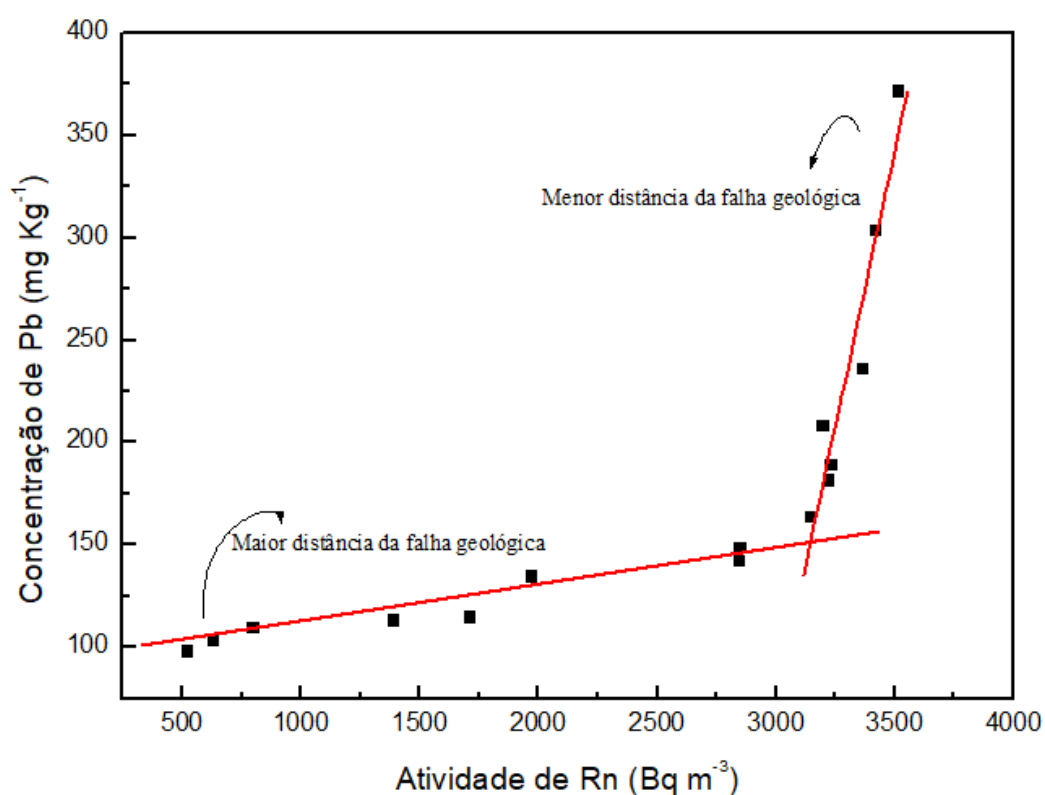
Tais fatores são importantes pois explicam a maior dispersão dos pontos na Figura 39, e a baixa correlação existente entre concentração de chumbo e atividade de Rn. As amostras de rochas do primeiro cenário fazem parte de um afloramento de falha geológica que proporciona maior emissão e exalação do gás Rn, no entanto devido a ausência da fração argila nas amostras, que facilitam a capacidade de troca de cátion, observou-se menor concentração de chumbo.

Também foi possível estabelecer as correlações lineares entre as duas variáveis (Figura 40), para as amostras do cenário 2 (Brasil) onde observou-se duas distribuições quanto aos 15 pontos analisados.

A primeira reta da Figura 40, indica uma correlação estatisticamente significativa com valor p inferior a 0,05 e representam os pontos de amostragem que se encontram mais distantes da falha geológica.

A segunda reta, que representa os pontos com maior proximidade à falha geológica, apresentou valor de p inferior a 0,05 indicando uma correlação estatística satisfatória. Tais correlações permitem estabelecer uma hipótese da influência do aumento das atividades de Rn e concentrações de Pb em amostras de solo que encontram-se mais próximas das falhas geológicas e uma possível diminuição desse valores conforme se afastam da mesma.

Figura 40 - Determinação do coeficiente de correlação de Person para as variáveis concentração de Pb e atividade de Rn para o cenário 2.



7. Conclusão

De acordo com os dados explanados no item 6, pode-se verificar que os menores valores de atividade de U^{235} foram de 6,800 e 6,900 Bq Kg⁻¹, respectivamente para as regiões de Sangemil e Oliveira do Hospital (rotatória) em contraste com o valor de 846,9 Bq Kg⁻¹ aferido no ponto 28 (P28) situado no Parque Municipal, também no município de Oliveira do Hospital.

Ao se tratar dos valores de atividade de U^{238} , verificou-se que os valores médios dessa atividade no cenário 1 são maiores que o valor médio mundial que equivale a 35 Bq Kg⁻¹. Pode-se apontar uma contribuição muito significativa da atividade desse radioisótopo, especificamente no ponto 28 (P28) do Parque Municipal de Oliveira do Hospital, que extrapolou o valor de 13280,0 Bq Kg⁻¹.

Em relação aos valores médios de atividade de Th^{232} constatou-se uma baixa amplitude, sendo a região de Sangemil com atividade média de 94,4 Bq Kg⁻¹ e a região de Penalva com 113,6 Bq Kg⁻¹. Tais valores são maiores do que o valor médio mundial que é de 30 Bq kg⁻¹, indicando que essas amostras de rochas são ricas em mineral de tório.

Para o cenário 1, a maioria dos valores de K ($^{238}U/^{230}Th$) encontram-se em uma razão que varia entre 0,7 e 1,8 que é indicativo de rochas ígneas recentes, confirmando tal característica das amostras em estudo.

Conforme aferição do teor de rádio e radônio nas amostras do cenário 1 via medidor AlphaGuard em contentores metálicos, com relação ao ^{226}Ra exalado observou-se um valor mínimo de 112,1 Bq Kg⁻¹ (P33) e máximo de 1034,8 Bq Kg⁻¹ (P28). Para os valores referentes à exalação do gás radônio, verificou-se em P17 o menor valor (11,38 Bq Kg⁻¹), e em P28 o maior valor correspondendo a mais de 630,0 Bq Kg⁻¹. Tais valores estão coerentes por se tratar de amostras de solos/rochas de regiões de granito, considerando os graus de alteração quando se trata de rochas.

Segundo o cálculo do coeficiente de emanção (E) das amostras de rochas graníticas, os valores variaram entre 0,13 e 0,39 corroborando com os valores esperados para amostras graníticas.

De acordo com os resultados obtidos para as concentrações de ^{222}Rn no leito das rochas para a região de Sangemil, foi possível desenvolver um croqui da região indicando a exalação de radônio geogênico. Para o valor mais alto, de 1.609.273 Bq m⁻³ de gás radônio, propôs-se como concentração anômalas ligada fortemente às falhas

geológicas enriquecidas de urânio, com provável mineralização pontual desse analito, classificando tal ponto no bloco de falha como anômalo.

Para as áreas de maior exalação de Rn associou-se também maior concentração da atividade de urânio. Para os pontos P3 e P16, tem-se os maiores valores da média de exalação de ^{222}Rn , de 965.592 e 1.295.474 Bq m⁻³ respectivamente; e também valores elevados para a concentração de atividade de urânio, sendo 17,7 e 28,7 mg Kg⁻¹ respectivamente.

As médias das concentrações de Pb total (aferidas via método eletroquímico) foram de 12,01 mg Kg⁻¹ para Sangemil; Oliveira do Hospital/Quinta (63,55 mg Kg⁻¹); Oliveira do Hospital/Penalva (6,438 mg Kg⁻¹); Oliveira do Hospital/Rotatória (4,167 mg Kg⁻¹) e Oliveira do Hospital/ Parque Municipal (6,870 mg Kg⁻¹). Tais valores encontram-se dentro dos permitidos para a Comunidade Europeia.

As amostras do cenário 1, mesmo apresentando valores radiométricos mais elevados, característicos de regiões de falhas geológicas e até mesmo de áreas enriquecidas de urânio, indicaram concentrações de Pb total relativamente baixas, sendo consideradas dentro na média natural de granitos.

Para os pontos B1 a B15 (cenário2) a variação de concentração de Pb foi em um intervalo de 23,41 a 371,23 mg kg⁻¹, sendo valores mais elevados que os aferidos em Portugal.

Quanto maior a distância dos pontos de coleta em relação à falha geológica, no cenário 2, os valores de concentração de chumbo e atividade de Rn tendem a diminuir, bem como a fração de argila nas amostras de solos. Portanto, conclui-se que existe uma relação direta no aumento da atividade de Rn em pontos que se encontram mais próximos à falha geológica, bem como o aumento da concentração de Pb total que é garantida pela presença de argila na composição do solo.

Existe uma relação de baixa magnitude entre as variáveis do cenário 1, que pode estar atrelada ao fato das amostras serem livres de fração argila, uma vez que são rochas do tipo graníticas e consequentemente apresentaram menor concentração de chumbo e maior atividade de gás radônio.

Por fim foi possível estabelecer duas correlações lineares entre as variáveis para as amostras do cenário 2. A primeira está relacionada aos pontos de amostragem mais distantes da falha geológica e a segunda reta é referente às amostras que estão mais próximas da falha geológica, e ambas possuem correlação estatística satisfatória.

8. Referências

- [1] TYKVA, R. and BERG, D. Man-made and natural radioactivity in environmental pollution and radiochronology. Dordrecht ; Boston, Kluwer Academic Publishers 2004, p.
- [2] UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Report to the General Assembly, with Scientific Annexes**, v. Volume II, n. p. United Nations Sales Publication, New York, 2000.
- [3] PLANINIC, J.; RADOLIC, V. and LAZANIN, Z. Temporal variations of radon in soil related to earthquakes. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 55, n. 2, p. 267-272, 2001.
- [4] SHWEIKANI, R.; GIADDUI, T. G. and DURRANI, S. A. The Effect of Soil Parameters on the Radon Concentration Values in the Environment. **Radiation Measurements**, v. 25, n. 1-4, p. 581-584, 1995.
- [5] SCHROEDE, G.L.; KRANER, H. W. and EVANS, R. D. Diffusion of Radon in Several Naturally Occurring Soil Types. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, n. 2, p. 471-&, 1965.
- [6] ZARROCA, M., LINARES, R. BACH, J, ROQUE, C. , MORENO, V. , BAIXERAS, C Integrated geophysics and soil gas profiles as a tool to characterize active faults: the Amer fault example (Pyrenees, NE Spain). **Environment Earth Science** v. 67, n. p. 889–910, 2012.
- [7] AL-HILAR, M. and AL-ALI, A. Investigation for Uranium Dispersion Adjacent to Cretaceous Phosphatic Outcrops in Al-Nassrieh Basin, Southern Palmyrides, Syria. **Journal of Earth Science**, v. 27, n. 5, p. 786-795, 2016.
- [8] GIRAULT, F.; POITOU, C.; PERRIER, F.; KOIRALA, B. P. and BHATTARAI, M. Soil characterization using patterns of magnetic susceptibility versus effective radium concentration. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 11, n. 8, p. 2285-2293, 2011.
- [9] ESPINOSA, G., GOLZARRI, J.L., GAMMAGE, R.B., SAJO-BOJUS, L., VICCON-PALE, J., SIGNORET-POILLON, M. Seasonal variation measurements of radon levels in caves using SSNTD method. **Radiation Measurements**, v. 43, n. p. 364-368, 2008.
- [10] ALLOWAY, B. J., ed. *Heavy Metals in Soils*. 1 ed., ed. B. A. S. LTD. 1990.
- [11] DORAN, J. W. and ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 15, n. 1, p. 3-11, 2000.
- [12] APREA, C.; COLOSIO, C.; MAMMONE, T.; MINOIA, C. and MARONI, M. Biological monitoring of pesticide exposure: a review of analytical methods. **Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences**, v. 769, n. 2, p. 191-219, 2002.
- [13] TEIXEIRA, M. M. R. F., M.C. . Concentração de radão em habitações a nível nacional. **III Conf. Nacional sobre a Qualidade do Ambiente**, v. 2, n. p. 522-531, 1992.
- [14] FIGUEIREDO, J. M. S. **O radão nos materiais geológicos da área urbana de Castelo Branco**. . 1998. f. - Depto Ciências da Terra, Universidade de Coimbra,, Coimbra.
- [15] PEREIRA, A. J. S. C.; BARBOSA, S. M.; NEVES, L. J. P. F. and AUMENTO, F. Soil-gas radon monitoring in an active granite quarry from central Portugal. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 11, n. 7, p. 1845-1849, 2011.

- [16] NEVES, L. J. P. F.; BARBOSA, S. M. and PEREIRA, A. J. S. C. Indoor radon periodicities and their physical constraints: a study in the Coimbra region (Central Portugal). **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 100, n. 10, p. 896-904, 2009.
- [17] NEVES, L. J. P.; PEREIRA, A. J. S. and GODINHO, M. M. The role of cooling rate on the Al-Si order of K-feldspar in the Hercynian Tabua granite, central Portugal. **Canadian Mineralogist**, v. 39, n. p. 85-92, 2001.
- [18] MARTINS, L. M. O.; GOMES, M. E. P.; TEIXEIRA, R. J. S.; PEREIRA, A. J. S. C. and NEVES, L. J. P. F. Indoor radon risk associated to post-tectonic biotite granites from Vila Pouca de Aguiar pluton, northern Portugal. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 133, n. p. 164-175, 2016.
- [19] SANTOS, C. E. L. C., R. V. ; VIGNOL, M. L. ; XAVIER, A ; GOUVEA, V. ; MACACINI, J. F. Estimate Of Radiation doses to workers in underground mines of coal and fluorite in the Brazilian state of Santa Catarina and considerations on the optimisation of radiation protection **International Nuclear Atlantic Conference**, v. 1, n. p. 2009.
- [20] CNEN, *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*, C. N. D. E. NUCLEAR, Editor. 2005: Brasil.
- [21] VASCONCELOS, D. C. L., C. P. B. ; OLIVEIRA, A. H. ; OLIVEIRA, A. H. ; SANTOS, T.O ; ROCHAZ. ; MENEZES, M. A. B. Determination of natural radioactivity in beach sand in the extreme south of Bahia, Brazil, using gamma spectrometry **Radiation Protection and Environment**, v. 0972-0464, n. p. 178-184, 2011.
- [22] FERREIRA, C. M.-N., L.M; NORDEMAN, D.JR. A RADIOATIVIDADE NATURAL DA REGIÃO DE IRECÊ, BA. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 2, n. 22, p. 167-174, 1992.
- [23] CAMPOS, T. F. C., PRETTA, R.A., MALANCA, A., PASTURA, V.F.S., SICHEL, S.E., MOTOKI, A. O Gás Radônio Doméstico e a Radioatividade Natural Em Terrenos Metamórficos: o Caso do Município de Lucrecia (Rio Grande do Norte, Brasil). **Revista de Geologia**, v. 26, n. 2, p. 85-93, 2013.
- [24] GOMEZ, D. P.; NEVES, L.; PEREIRA, A. and NEILA, C. G. Natural radioactivity in ornamental stones: an approach to its study using stones from Iberia. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 70, n. 4, p. 543-547, 2011.
- [25] JELINEK, A. J. and FITTING, J. E. Studies in the natural radioactivity of prehistoric materials. Ann Arbor,, University of Michigan 1965, p.
- [26] HULT, M. A., E; GONZ DE ORDUNA, R.; POMM, S; YELTEPE, E. . Quantification of uranium-238 in environmental samples using gamma-ray spectrometry. **EPJ Web of Conferences** v. 24, n. p. 1-12, 2012.
- [27] OTTON, J. K., GUNDERSEN, L.C.S., SCHUMANN, R. The Geology of Radon. **Department of the Interior/U.S**, v. Geological Survey, n. Disponível em <<http://energy.cr.usgs.gov/radon/georadon.html>> Acesso em 25/10/2013, p. 1995.
- [28] PORSTENDOFER, J. Properties and behaviors of radon and thoron and their decay products in the air. . **Commission of the European Communities - International Symposium on the Natural Radiation Environment**, v. 50, n. p. 1993.
- [29] ALENCAR, A. S. E. F., A.C. Reference levels of natural radioactivity for the beach sands in a Brazilian southeastern coastal region. **Radiation Measurements**, v. 40, n. p. 76-83, 2005.

- [30] ATTIX, F. H., ed. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. 1986, Wiley and Sons: USA.
- [31] SURVEY, U. S. G. Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps. **Geological Survey Publication**, v. Version 1.2, n. p. 2018.
- [32] ANASTASIA, D. J., ERSLEV E.A., FISHER, D.M.,. Fault-related folding. **Journal of Structural Geology** v. 19, n. p. 602, 1997.
- [33] DAVIS, G. H. A. R., S., ed. *Structural Geology of Rocks and Regions*. ed. WILEY. 1996.
- [34] RUTQVIST, J., WU, Y. S, TSANG, C. F., CF, BODVARSSON,G. . A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 39, n. 4, p. 429-442, 2002.
- [35] JACKSON, J., PRIESTLEY, K., ALLEN, M. AND BERBERIAN, M. Active Tectonics of the South Caspian Basin. **Geophysical Journal International**, v. n. 148, p. 214-245, 2002.
- [36] SAADI, A. M., M. N., ed. *Map and Database of Quaternary Faults and Lineaments in Brazil*, ed. U. S. G. SURVEY. Vol. 1. 1999: Denver/Colorado:.
- [37] BALCAZAR, M.; GONZALEZ, E.; ORTEGA, M. and FLORES, J. H. Geothermal-Energy Prospecting in El-Salvador. **Nuclear Tracks and Radiation Measurements**, v. 22, n. 1-4, p. 273-276, 1993.
- [38] SANTANNA, L. G.; SCHORSCHER, H. D. and RICCOMINI, C. Cenozoic tectonics of the Fonseca Basin region, eastern Quadrilatero Ferífero, MG, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 10, n. 3-4, p. 275-284, 1997.
- [39] LAMAS, R.; MIRANDA, M. M.; PEREIRA, A. J. S. C.; NEVES, L. J. P. F.; FERREIRA, N. and RODRIGUES, N. V. 3-D distribution of the radioelements in the granitic rocks of northern and central Portugal and geothermal implications. **Journal of Iberian Geology**, v. 43, n. 1, p. 3-12, 2017.
- [40] CABRAL, J., RIBEIRO, A. . Carta neotectónica de Portugal Continental, escala 1/1000000. . **Serviços Geológicos de Portugal**, v. 1, n. p. 1988.
- [41] GOLDSCHTIDT, V. M. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. **J. Chem. Soc**, v. n. p. 655-673, 1937.
- [42] MAROCCHI, M., RIGHI, S., BARGOSSA, G. M., GASPAROTTO, G. Natural radionuclides content and radiological hazard of commercial ornamental stones, an integrated radiometric and mineralogical-petrographic study. . **Radiation Measurements**, v. 46, n. p. 538-545, 2011.
- [43] BASTOS, R. O., APPOLONI, C. . Radioactivity of rocks from the geological formations belonging to the Tibagi river hydrographic basin. **International Nuclear Atlantic Conference**, v. 1, n. p. 2009.
- [44] EL-ARABI, A. Ra-226, Th-232 and K-40 concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications. **Radiation Measurements**, v. 1, n. 42, p. 94-100, 2007.
- [45] MOURA, C. L., ARTUR, A., BONOTTO, D. M., GUEDES, S., MARTINELLI, D. M. Natural radioactivity and radon exhalation rate in brazilian igneous rocks. . **Applied Radiation and Isotopes**, v. n. p. 2011.
- [46] DIJKERMAN, J. C. Pedology as a science: The role of data, models and theories in the study of natural soil systems. **Geoderma**, v. 11, n. 2, p. 73-93, 1974.

- [47] EMBRAPA, *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, C. N. D. P. D. SOLOS, Editor. 2018: Rio de Janeiro.
- [48] STAFF, S. S., *Soil survey manual*, D. O. AGRICULTURE, Editor. 1951: United States.
- [49] LEPSCH, I. F. 19 lições de pedologia fácil. **São Paulo: Oficina de Textos**, v. n. p. 456, 2011.
- [50] AZEVEDO, A. C. T., P. V., *Química e Mineralogia do Solo*, V. S. B. D. C. D. SOLO, Editor. 2009. p. 381-426.
- [51] ABNT, *NBR 6502 - Rochas e solos - Terminologia*, A.-A. B. D. N. TÉCNICAS, Editor. 1995: Rio de Janeiro.
- [52] LEMOS, R. C. S., R.D, *Manual de descrição e coleta de solo no campo*, in *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, C. N. D. P. D. SOLOS, Editor. 1996: Campinas.
- [53] CURCIO, G. R. L., V.C; GIAROLA, N.F.B, *Antropossolos: proposta de ordem (1º aproximação)*, EMBRAPA, Editor. 2004, 1: Colombo.
- [54] AHBERG, G., GUSTAFISSON, O., WEDEL, P. . Leaching of metals from sewage sludge during one year and their relationship to particle size. **Environ. Pollut.** , v. 144, n. p. 545-553, 2006.
- [55] ADRIANO, D. C. Trace elements in the terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. **Springerplus**, v. 1, n. p. 2001.
- [56] KETTERER, M. E., LANE, D.A., JORDAN, J.A. . Unusually Radiogenic Lead (Pb) in Ashtabula River Sediments: An Isotopic Tracing Case Study Using Quadrupole ICP-MS. . **Open Chem. Biom.Meth. J**, v. 2, n. p. 2010.
- [57] KOMARE, M., ETTLER, V., CHASTNY, V., MIHALJEVIC, M. . Lead isotopes in environmental sciences: A review. . **Environ. Intern.**, v. 34, n. p. 562-577, 2008.
- [58] BOLLHOFFER, A., CHISHOLM, W, ROSMAN, K.J.R. . Sampling aerosols for lead isotopes on a global scale. . **Anal. Chim. Acta**, v. 390, n. p. 227-235, 1999.
- [59] CHENG, H., HU, Y. . Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: A review. . **Environ Pollut.**, v. 158, n. p. 1134-1146, 2010.
- [60] AMBIENTE, C.-C. N. D. M., *Critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas*, CONAMA, Editor. 2009, 420.
- [61] CETESB. Valores orientadores para solo e água subterrânea, Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/noticia/596,Noticia>>. Acesso em: 22/11/2014
- [62] AMBIENTE, A.-A. P. D., *Qualidade do Ar em Espaços Interiores: Um Guia Técnico*, D. O. MINISTÉRIO DO AMBIENTE, DO TERRITÓRIO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, Editor. 2009: Amadora.
- [63] PROENCA, C. A. B., N. ; MAROUBO, L. ; MOREIRA-SILVA, M. R. ; GOMES, HOMERO M. ; TEIXEIRA, M. F. S. Simultaneous determination of Cd, Pb, and Cu in atmospheric particulate matter from different regions of the city of Presidente Prudente, Sao Paulo, Brazil. **Chemistry and Ecology**, v. 32, n. p. 598-607, 2016.
- [64] MOREIRA-SILVA, M. R. J. T., C, A, S; NUNES, J. O. R; GODOY, M; TEIXEIRA, M.F.S. Evidence for a correlation between total lead concentrations in soils and the presence of geological faults. **Environmental Chemistry Letter**, v. n. p. 2017.

- [65] PEREIRA, A. J. S. C.; GODINHO, M. M. and NEVES, L. J. P. F. On the influence of faulting on small-scale soil-gas radon variability: a case study in the Iberian Uranium Province. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 101, n. 10, p. 875-882, 2010.
- [66] ROSS, J. L. S. M., I.C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 10, n. p. 1996.
- [67] AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, E. B. D. P., *Sistema brasileiro de Classificação de Solos*, in *Brasília-DF: Serviço de Produção de Informação*. 1999.
- [68] FUSHIMI, M. N., J. O. R. Principais classes de solos do município de Presidente Prudente-SP: identificação e caracterização. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 32, n. 1, p. 45-58, 2012.
- [69] GODOY, M. C. T. F. B., MARCOS NORBERTO ; SANAIOTTI, D. C. ; SILVA, JOEL BATISTA DA, *Contaminação das águas subterrâneas por nitrato em Presidente Prudente - SP, Brasil*, in *Revista do Instituto Adolfo Lutz*. 2004: São Paulo-SP. p. 208-214.
- [70] GODOY, M. C. T. F. S., L. E. ; SOUZA FILHO, A, *O risco tecnogênico no planejamento físico-territorial: exemplo de área de ampliação do Distrito Industrial de Presidente Prudente - SP*, in *Caderno Prudentino de Geografia*. 2002: Presidente Prudente-SP. p. 74-92.
- [71] CETESB. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. CETESB, GTZ. v. 2.ed., n. São Paulo., p. 2001.
- [72] SILK, E. C. H. B., R. S. Examination of fission fragments tracks with an Electron Microscope. **Philosophical Magazine**, v. 4, n. p. 970-971, 1959.
- [73] DE PAULO, S. R. **Dosimetria ambiental de Rn-222 e filhos: Medida da eficiência absoluta do CR-39 levando-se em conta os efeitos do plate-out e fatores ambientais**. 1991. f. - UNICAMP, Campinas/SP.
- [74] GUEDES, S.; HADLER, J. C.; IUNES, P. J.; NAVIA, L. M. S.; NEMAN, R. S.; PAULO, S. R.; RODRIGUES, V. C.; SOUZA, W. F.; TELLO, C. A. and ZUNIGA, A. Indoor radon and radon daughters survey at Campinas-Brazil using CR-39: First results. **Radiation Measurements**, v. 31, n. 1-6, p. 287-290, 1999.
- [75] ABU-JARAD, F. W., C. K.; FREMLIN, J. H. The registration of the alpha particles from polonium isotopes plated-out on the surface of the plastic detectors Lr-115 and Cr-39. **Nuclear Tracks and Radiation Measurements**, v. 5, n. p. 285-290, 1981.
- [76] LIMA, R. M. F. L., J. A. M. Análise Granulométrica em Técnicas que se Baseiam em Sedimentação Gravitacional: Lei de Stokes. **Revista da Escola de Minas**, v. 54, n. Ouro Preto, p. 155-159, 2001.
- [77] EMBRAPA, E. B. D. P. A.-. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*, E. S. E. I. A. E. C. P. T. D. TECNOLOGIA, Editor. 1999: Brasília. p. 370.
- [78] USEPA, U. S. E. P. A.-. *Method 3050 Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils.* , E. C. N. 68-03-3254, Editor. 1988: USA.
- [79] ALMEIDA, A. M. Determinação voltamétrica de molibdênio (VI) utilizando um sistema ternário homogêneo de solventes. **Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química**, v. n. p. 2003.
- [80] GRAY, A. W. Minimum Critical Mass of Uranium-235 Reflected by Natural Uranium in Water. **Nuclear Technology**, v. 12, n. 4, p. 342-347, 1971.

- [81] ALLEGRE, C. J., CONDOMINES, M. Fine chronology of volcanic process using U-Th systematics. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 28, n. p. 395-406, 1976.
- [82] CONDOMINES, M., HERMOND, C., ALLEGRE, C. J., U-Th-Ra radioactive disequilibria and magmatic processes. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 90, n. p. 243-262, 1988.
- [83] GILL, J. B., PYLE, D., WILLIAMS, R.W. Igneous rocks - uranium series disequilibrium. **Applications to Earth, Marine and Environmental**, v. 2, n. p. 1992.
- [84] SAKODA, A. I., Y.; YAMAOKA, K. A. A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. . **Applied Radiation and Isotopes**, v. 69, n. p. 1422–1435, 2011.
- [85] PEREIRA, A.; LAMAS, R.; MIRANDA, M.; DOMINGOS, F.; NEVES, L.; FERREIRA, N. and COSTA, L. Estimation of the radon production rate in granite rocks and evaluation of the implications for geogenic radon potential maps: A case study in Central Portugal. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 166, n. p. 270-277, 2017.
- [86] MEHRA, R. B., P. Estimation of annual effective dose due to radon level in indoor air and soil gas in Hamirpur district of Himachal Pradesh. **Journal of Geochemical Exploration**, v. n. p. 2013.
- [87] BOURAI, A. A. A., S; DANGWAL, A; RAWAT, M; PRASAD, M. Measurement of radon flux and soil-gas radon concentration along the main central thrust, Garhwal Himalaya, using SRM and RAD7 detectors. **acta Geophysica**, v. 4, n. 61, p. 950-957, 2013.
- [88] LUBIN, J. H. B., J. D; EDLING, C.; HORNUNG, R. W., *Radon and Lung Cancer Risk: a Joint Analysis of 11 Underground Mines Studies*, in *US Department of Health and Human Services*: Washington.
- [89] ENVIRONMENT, C. C. O. M. O. T., *Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health*, C. C. O. M. O. T. ENVIRONMENT, Editor. 1999: Canadá.
- [90] ATSDR, *Toxicological Profile for lead.*, D. O. P. H. A. H. S.-P. H. SERVICE, Editor. 2007: Atlanta.
- [91] BECKETT, P. H. T., *Critical tissue concentrations as indicators of toxicity*. 1991.
- [92] MELO, V. F. Z., S.; ANDRADE, A.M.; BROSKA, C.Z. Chumbo em solos às margens de estradas na região metropolitana de Curitiba. **Revista Acadêmica de Ciência Agrária e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 45-57, 2010.
- [93] OLSZOWY H, T. P., IMRAY P, SMITH P, HEGARTY J, HASTIE G. Trace element concentrations in soils from rural and urban areas of Australia. **Australian Health Commission**, v. 4, n. p. 1995.
- [94] ALBERT, H. P., M. Trace elements in soils. **Elsevier Scientific Publishing Company**, v. n. p. 395, 1977.
- [95] XIAN, X. Effect of Chemical Forms of Cadmium, Zinc, and Lead in Polluted Soils on Their Uptake by Cabbage Plants. **Plant and Soil**, v. 113, n. 2, p. 257-264, 1989.
- [96] ALLEONI, L. R. F.; PEIXOTO, R. T. D.; DE AZEVEDO, A. C. and MELO, L. C. A. Components of Surface Charge in Tropical Soils With Contrasting Mineralogies. **Soil Science**, v. 174, n. 11, p. 629-638, 2009.